

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 10-132866

(43)Date of publication of application : 22.05.1998

(51)Int.Cl.

G01R 15/24

G01R 29/12

(21)Application number : 08-288694

(71)Applicant : NISSIN ELECTRIC CO LTD

(22)Date of filing : 30.10.1996

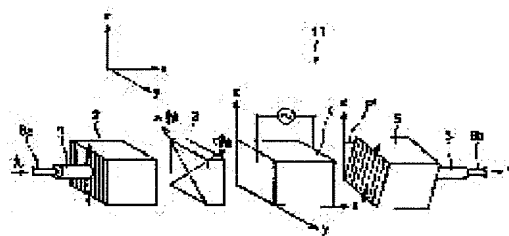
(72)Inventor : KUMEGAWA HIROSHI

## (54) OPTICAL VOLTAGE-ELECTRIC FIELD SENSOR

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide an optical voltage - electric field sensor capable of improving temperature characteristics and accurately measuring over the use temperature range by optimizing the relationship of optical parts.

SOLUTION: By making the deviation direction from the reference phase difference 90 degrees of a  $\lambda/4$  plate 3 constant, the position of an analyzer 5 is controlled according to the deviation direction. That is, in the case the analyzer 5 is arranged at the reference position where the modulation sensitivity becomes maximum and the error of direct current component of the output of the analyzer 5 reduces compared with the reference phase difference of 90 degrees, the analyzer 5 is arranged within the angle of ca. 30 degrees turning leftward from the upstream to the downstream of the light progression direction. On the other hand, in the case the error of the direct current component increases compared with the reference phase difference of 90 degrees, the analyzer 5 is arranged within the angle of ca. 30 degrees turning rightward from the upstream to the downstream of the light progression direction.



(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公 開 特 許 公 報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平10-132866

(43)公開日 平成10年(1998) 5月22日

(51)Int.Cl.<sup>6</sup>

G 0 1 R 15/24  
29/12

識別記号

F I

G 0 1 R 15/07  
29/12

C  
F

審査請求 未請求 請求項の数 2 O L (全 22 頁)

(21)出願番号

特願平8-288694

(22)出願日

平成 8 年 (1996) 10 月 30 日

(71)出願人 000003942

日新電機株式会社

京都府京都市右京区梅津高畝町47番地

(72)発明者 久米川 宏

京都府京都市右京区梅津高畝町47番地 日

新電機株式会社内

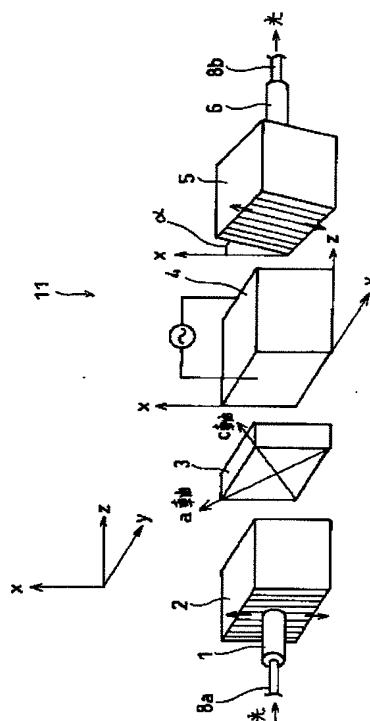
(74)代理人 弁理士 原 謙三

(54)【発明の名称】 光電圧・電界センサ

(57)【要約】

【課題】 光電圧・電界センサの温度特性を改善する。

【解決手段】  $\lambda/4$ 板3の基準位相差  $90^\circ$  からの偏移方向を一定にし、その偏移方向に応じて検光子5の位置を調整する。即ち、検光子5を変調感度が最大となる基準位置に配した合であって、 $\lambda/4$ 板3の位相差の偏移により検光子5の出力の直流成分の誤差が基準位相差  $90^\circ$  のときに比べて減少する場合には、当該基準位置より、光の進行方向の上流から下流に向かって左まわりに約  $30^\circ$  以内の角度範囲内に検光子5を配置する一方、上記直流成分の誤差が基準位相差  $90^\circ$  のときに比べて増加する場合には、当該基準位置より、光の進行方向の上流から下流に向かって右まわりに約  $30^\circ$  以内の角度範囲内に検光子5を配置する。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 光の進行方向に沿って偏光子、波長板、電気光学結晶、及び検光子が順次配置された光電圧・電界センサにおいて、

上記波長板は、基準温度における基準位相差からの偏移の方向が、使用温度範囲内で常に一定になるように設定されており、

上記検光子は、電気光学結晶との間の位置関係によって定まる変調感度が最大となる基準位置に配された場合であって、波長板の位相差の上記設定方向への偏移により検光子出力の直流成分が基準位相差のときに比べて減少する場合には、当該基準位置より、光の進行方向の上流から下流に向かって左まわりに約 $30^\circ$ 以内の角度範囲内に配置される一方、波長板の位相差の上記設定方向への偏移により検光子出力の直流成分が基準位相差のときに比べて増加する場合には、当該基準位置より、光の進行方向の上流から下流に向かって右まわりに約 $30^\circ$ 以内の角度範囲内に配置されていることを特徴とする光電圧・電界センサ。

【請求項2】 上記電気光学結晶が旋光性を有し、上記検光子の基準位置は、当該検光子の偏光方向が、上記電気光学結晶における光の進行方向と直交する結晶軸に対して、当該結晶の旋光性によって偏光面が回転する方向と同一方向に旋光角の略半分の角度だけ傾けられた位置であることを特徴とする請求項1記載の光電圧・電界センサ。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、ポッケルス素子などの電気光学素子を使用して電圧又は電界の強度を測定するための光電圧・電界センサに関するものである。

## 【0002】

【従来の技術】 電力系統の電圧測定には、電圧変成器が広く用いられている。しかしながら、この電圧変成器は、測定すべき系統電圧が高くなるほど大型化してしまい、コストおよびスペースが嵩むという問題がある。特にGISと称される不活性ガスを用いたガス絶縁開閉装置では、小型化および省スペース化が強く要求され、このような電圧変成器を搭載することが困難になっている。

【0003】 このため、従来から、ポッケルス素子などの電気光学素子を用いた光電圧センサが用いられるようになってきている。図20及び図21に、典型的な従来の光電圧センサの構成を示す。

【0004】 図20に示すように、上記の光電圧センサ80は、光学部品から成るセンサ部50と、発光回路60と、信号処理回路である受光回路70とを備えている。センサ部50は上記開閉装置などに関連して配置され、残余の発光回路60及び受光回路70は前記センサ部50とは離間した変電所建屋内などに配置され、これ

らの間は、たとえば100m以上に及ぶこともある図示しない光ファイバによって接続されている。

【0005】 図21に示すように、上記センサ部50は、光ファイバを介して導入された発光回路60からの光を平行光にするコリメータ51と、ランダムな上記平行光を直線偏光にする偏光子52と、上記直線偏光を円偏光にする $\lambda/4$ 板53と、印加電圧に応じて位相変調を行って上記円偏光を楕円偏光にするポッケルス素子54と、ポッケルス素子54からの楕円偏光における所定の偏光方向の成分のみを抽出する検光子55と、コリメータ56とを備えている。

【0006】 上記ポッケルス素子54の表面部には図示しない透明電極が設けられており、測定対象の電圧が光の進行方向に印加される。例えば、上記ポッケルス素子54には、電力系統の充電導体と、当該充電導体と並行に配設された浮遊導体とによって形成される浮遊容量と、前記浮遊導体と接地電位との間に設けたコンデンサとによって、前記充電導体の電圧が分圧されて印加される。尚、上記ポッケルス素子54の表面部に電極を設けることなく当該素子を電界中に配置すれば、光の進行方向の電界の強度を測定することが可能であり、光電界センサとなる（尚、ここでは光電圧センサとして説明を続ける）。

【0007】 上記センサ部50の各光学部品は、通常、以下のような位置関係になっている。この位置関係を説明するために、図21に示すように、x軸、y軸、z軸からなる直交座標系を考え、ポッケルス素子54として使用される電気光学結晶の各結晶軸を、上記x軸、y軸、z軸に一致させて（1軸性結晶の場合、その光学軸をz軸に一致させて）配した場合について説明する。尚、z軸方向を光の進行方向とする。

【0008】 一般的には、同図に示すように、 $\lambda/4$ 板53のc軸（光学軸）がx軸に対して $45^\circ$ だけ傾けられると共に、偏光子52の偏光方向は上記c軸に対して $45^\circ$ 傾いたx軸上に配される。そして、検光子55の偏光方向は、同図のように偏光子52の偏光方向と平行に配される（いわゆる平行偏光子）か、又は検光子55の偏光方向が偏光子52の偏光方向と直交するように配される（いわゆる直交偏光子）。

【0009】 上記センサ部50で変調された光は、図20に示すように、光ファイバを介して受光回路70へ入力される。受光回路70では、センサ部50の出力光をフォトダイオード（略称PD）71にて光/電気変換する。フォトダイオード71からの出力は、増幅器72で増幅された後にハイパスフィルタ（略称HPF）73と、ローパスフィルタ（略称LPF）74とに共通に入力されている。ハイパスフィルタ73からの出力は、除算器75において、ローパスフィルタ74からの出力と除算されて出力される。

【0010】 したがって、除算器75の出力は、ハイパ

スフィルタ73で抽出された交流成分ACを、ローパスフィルタ74で抽出された直流成分DCによって除算した値となり、上記発光回路60の発光光量の変化、フォトダイオード71の受光感度変化及び光ファイバ等の伝送路損失の変化などによる光量損失の影響を除去して、正確な系統電圧の測定を行うことができる。

$$I = (I_0/2) \{1 \pm \sin(\Gamma v + \delta)\} \quad \dots (1)$$

但し、 $I_0$ は偏光子52をそれぞれ通過した後の光量であり、 $\Gamma v$ はポッケルス効果によって生じる位相差であり、 $\delta$ は $\lambda/4$ 板4を通過するときに分解された光の位相差の $90^\circ$ からの偏移量である。また、 $I$ は検光子55からの出射光量であり、当該検光子55を透過するP成分であるときには、 $\sin(\Gamma v + \delta)$ の項は+とな\*

$$I = (I_0/2) \{1 \pm (\Gamma v + \delta)\} \quad \dots (2)$$

ところで、前記 $\lambda/4$ 板53は温度係数 $\beta a$ を有しており、当該光電圧センサ50の使用温度幅（基準温度から★

$$\delta a = \delta_0 (1 + \beta a \cdot T_a)$$

となる。ただし、 $\delta_0$ は基準温度での位相差である。

【0014】たとえば、前記 $\lambda/4$ 板54の温度係数 $\beta a$ が $-1.014 \times 10^{-4}$  ( $^\circ/\text{C}$ )であり、使用温度幅が $-20^\circ\text{C} \sim 80^\circ\text{C}$ の $100$  ( $^\circ\text{C}$ )であり、 $\delta_0 = \pi/2 = 90$  ( $^\circ$ )として、これらの数値を上式(3)に代入すると、

$$\delta a = 90 \{1 + (-1.014 \times 10^{-4}) \times 100\} = 89$$

となって、 $\delta = 1$  ( $^\circ$ )のずれが生じていることになる。

【0015】前記 $\lambda/4$ 板53における位相差が $90^\circ$ から偏移すると、 $\lambda/4$ 板53からの出射光は楕円偏光となる。これによって、検光子55からの出力光の光量変化が、ポッケルス効果、すなわち上式(1)における $\Gamma v$ によるものか、または $\lambda/4$ 板53の位相差偏移量 $\delta$ によるものかが分からず、ポッケルス素子54への印加電圧を正確に測定することができない。

【0016】本発明は、上記に鑑みてなされたものであり、その目的は、光学部品の位置関係を適正化することによってセンサの温度特性を改善し、使用温度範囲に亘って高精度な測定を行うことができる光電圧・電界センサを提供することにある。

#### 【0017】

【課題を解決するための手段】請求項1の発明に係る光電圧・電界センサは、光の進行方向に沿って偏光子（例えば、偏光ビームスプリッタ）、波長板（例えば、最適な光学バイアスとして機能する $\lambda/4$ 板）、電気光学結晶、及び検光子（例えば、偏光ビームスプリッタ）が順次配置されたものであって、上記の課題を解決するために、以下の手段が講じられていることを特徴としている。

【0018】先ず、上記波長板が、基準温度における基準位相差からの偏移の方向が、使用温度範囲内で常に一

#### \*【0011】

【発明が解決しようとする課題】上述のように構成される光電圧センサ1において、 $\lambda/4$ 板53およびポッケルス素子54を合わせての入出力の関係は下式1で表すことができる。

#### \*【0012】

※り、反射光であるS成分であるときには、 $\sin(\Gamma v + \delta)$ の項は-となる（図21の例では検光子55からは透過光が出力されている）。ここで、前記 $\sin(\Gamma v + \delta)$ が小さい（ $\ll 1$ ）場合には、前記式1は式2のように近似することができる。

#### 【0013】

★の差)を $T_a$ とし、温度によって偏移した後の位相差を $\delta a$ とすると、

$$\dots (3)$$

定になるように設定されている。さらに、上記検光子の位置が次のように調整されている。上記検光子が、電気光学結晶との間の位置関係によって定まる変調感度が最大となる基準位置に配された場合であって、

a) 波長板の位相差の上記設定方向への偏移により検光子出力の直流成分が基準位相差のときに比べて減少する場合には、当該基準位置より、光の進行方向の上流から下流に向かって左まわりに約 $30^\circ$ 以内の角度範囲内に検光子が配置され、

b) 波長板の位相差の上記設定方向への偏移により検光子出力の直流成分が基準位相差のときに比べて増加する場合には、当該基準位置より、光の進行方向の上流から下流に向かって右まわりに約 $30^\circ$ 以内の角度範囲内に検光子が配置されている。

【0019】尚、上記電気光学結晶としては、 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ や $\text{LiNbO}_3$ 等の旋光性のない結晶と、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ や $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 等の旋光性を有する結晶があるが、旋光性のない結晶は勿論のこと、請求項2に記載のように旋光性を有する結晶も使用することができる。

【0020】上記波長板の位相差変化の方向を、上記のように使用温度範囲内で常に一定にすることは、使用温度範囲 $T_{\text{bott}} \sim T_{\text{top}}$ の最低温度 $T_{\text{bott}}$ 以下又は最高温度以上の温度を基準温度としてその温度条件で波長板が基準位相差を持つように設定することによって実現可能である。

【0021】温度変化によって波長板の位相差が偏移した場合は、検光子から出力される光の直流成分（光学バイアス量）の変化として現れ、また、光学バイアス量の変化に伴って、交流成分の変化も生じる。この直流成分及び交流成分の誤差（基準位相差における各成分に対する比誤差）と、検光子を配する位置（変調感度が最大となる基準位置からの回転角度）との間には、一定の相関

関係がある。

【0022】そして、本願出願人は、波長板の位相差の偏移方向を上記のように一定にすれば、その偏移方向に応じて検光子の位置を調整することによって、交流成分の誤差と直流成分の誤差との差を小さくすることができるを見い出した。尚、センサ出力の信号処理において、上記交流成分を直流成分で除算した値（AC/DC）が用いられるが、この値の誤差は、交流成分の誤差と直流成分の誤差との差として近似されるので、位相差の偏移方向に応じて検光子の位置を調整することによって、結果的に温度特性を改善することが可能となる。

【0023】変調感度を最大にすることができる検光子の基準位置は、複数存在する。すなわち、ある位置に検光子を置いて変調感度が最大となれば、その位置から $\pm 90^\circ \times n$ （ $n$ は整数）の角度だけ光の進行方向を中心として検光子を回転させた位置でも、やはり変調感度は最大となる。

【0024】検光子をある基準位置において波長板の位相差を一定方向に変化（増加又は減少）させた場合、直流成分の比誤差には+又は-のオフセットが生じる。上記のa)のように、波長板の位相差の上記設定方向への偏移により検光子出力の直流成分が基準位相差のときに比べて減少する場合（すなわち、直流成分の比誤差が-の場合）には、基準位置より、光の進行方向の上流から下流に向かって左まわり方向に検光子を回転させると、AC/DCの比誤差が小さくなる。一方、上記のb)のように、波長板の位相差が上記の設定方向に偏移したときの検光子出力の直流成分が基準位相差のときに比べて増加する場合（すなわち、直流成分の比誤差が+の場合）には、基準位置より、光の進行方向の上流から下流に向かって右まわり方向に検光子を回転させると、AC/DCの比誤差が小さくなる。尚、感度最大の位置から余り大きくずれてしまうと必要な感度が得られなくなってしまうこと等を考えると、感度最大の位置より約 $30^\circ$ 以内の範囲で回転させることが好ましい。

【0025】上記のように、光学部品の位置関係を適正化することによってセンサの温度特性を改善することができるので、新たな部品を増やすことなく、使用温度範囲に亘って高精度な測定を行うことができる。

【0026】請求項2の発明に係る光電圧・電界センサは、請求項1の発明の構成において、上記電気光学結晶が旋光性を有しており、上記検光子の基準位置は、当該検光子の偏光方向が、上記電気光学結晶における光の進行方向と直交する結晶軸に対して、当該結晶の旋光性によって偏光面が回転する方向と同一方向に旋光角の略半分の角度だけ傾けられた位置であることを特徴としている。

【0027】旋光性を有する電気光学結晶を使用する場合、旋光性のない結晶とは上記の基準位置（感度最大の位置）が異なる。この基準位置を考える場合、電気光学

結晶の光の出射面における偏光の固有軸（すなわち、屈折率楕円体の主軸）がどの角度に存在するのかを考える必要がある。

【0028】電気光学結晶中を光が通過する際には直交する2方向に振動する直線偏光に分解されるが、この光の分解方向と一致するのが上記の偏光の固有軸であり、この軸は屈折率楕円体における光の進行方向と直交する2つの主軸に相当する。旋光性を有する電気光学結晶では、旋光性のない電気光学結晶と比較して、旋光性によって偏光面が回転する方向と同一方向に旋光角の略半分の角度だけ、光の出射面における偏光の固有軸が回転していると考えられる（詳細は実施の形態の欄で説明）。

【0029】ここで、電気光学結晶の光の出射面における偏光の固有軸と平行になるように検光子（その偏光方向）を配置すれば、感度は最低（殆ど0）となるが、この偏光の固有軸より $45^\circ \pm 90^\circ \times n$ （ $n$ は整数）の角度だけ光の進行方向を中心として回転させた位置に検光子を配置すれば、変調感度は最大となる。

【0030】したがって、電気光学結晶の各結晶軸をx軸、y軸、z軸（各軸は互いに直交）とし、z軸方向に光を入射する場合を考えると、旋光性のない電気光学結晶を使用した場合、検光子の偏光方向を電気光学結晶の結晶軸（x軸又はy軸）と一致させたときに変調感度が最大となることから、旋光性を有する電気光学結晶を使用した場合、上記のように検光子の偏光方向を、上記電気光学結晶における光の進行方向と直交する結晶軸（x軸又はy軸）に対して、当該結晶の旋光性によって偏光面が回転する方向と同一方向に旋光角の略半分の角度だけ傾ければ、変調感度は最大となる。

【0031】上記のように検光子の基準位置を定め、請求項1のように位相差の偏移方向に応じて検光子の位置を調整することによって、旋光性を有する電気光学結晶を使用する場合にもセンサの温度特性を改善することができる。

【0032】

【発明の実施の形態】

〔実施の形態1〕本発明の実施の一形態について図1ないし図8に基づいて説明すれば、以下の通りである。

【0033】本実施の形態では、電気光学効果素子としてポッケルス素子を用いた光電圧センサを例に挙げて説明する。

【0034】図2に示すように、光電圧センサ10は、光学部品から成るセンサ部11と、発光回路12と、信号処理回路である受光回路13とを備えている。上記センサ部11は、ケーシング7内に、光の入射側から順に配されたコリメータ1、偏光子2、 $\lambda/4$ 板3（波長板）、ポッケルス素子4、検光子5、及びコリメータ6を備えている。尚、偏光子2及び検光子5は偏光ビームスプリッタにて構成することができ、その透過光又は反射光の何れを利用してもよく、反射光を利用する場合、

10

20

30

40

50

コリメータ1及びコリメータ6はケーシング7の上部又は下部に設けられる。

【0035】上記コリメータ1には発光回路12からの光をケーシング7内へ導く光ファイバ8aが接続されている。上記光ファイバ8aに導かれた入射光は、コリメータ1を通過することによって平行光となる。この平行光の偏光方向はランダムであるが、偏光子2によって直線偏光となる。この直線偏光が $\lambda/4$ 板3の光学軸(c軸)に対して $45^\circ$ の角度で入射することによって、 $\lambda/4$ 板3を通過した光は円偏光となる。そして、この円偏光はポッケルス素子4へ入射する。

【0036】上記ポッケルス素子4は、電気光学結晶の光の入射面と出射面とに、光の透過を妨げないような一対の透明電極(図示せず)を付けたものである。このポッケルス素子4の一対の透明電極は、リード線9・9を介してケーシング7の外壁面に設けられた一対の電極9a・9aに接続されており、当該電極9a・9aに検出対象の電圧を印加することによって、ポッケルス素子4には光の進行方向に電界がかけられる。そして、ポッケルス素子4は、印加された電圧に応じて位相変調を行い(結晶内を伝搬する振動面が互いに直交する直線偏光に印加電圧に応じた位相差を生じさせ)、円偏光を楕円偏光にする。

【0037】上記ポッケルス素子4で位相変調され、印加電圧に応じた楕円率(長軸と短軸との比率)の楕円偏光は、検光子5に入射する。この検光子5は、所定の偏光方向の成分のみを抽出し、楕円偏光の楕円率に応じた(すなわちポッケルス素子4への印加電圧に応じた)光強度の直線偏光を出力する。そして、検光子5の出力光は、コリメータ6及び光ファイバ8bを介して受光回路13へ入力される。

【0038】上記受光回路13では、センサ部11の出力光をフォトダイオード14にて光/電気変換する。フォトダイオード14からの出力は、増幅器15で増幅された後にハイパスフィルタ16と、ローパスフィルタ17とに共通に入力されている。ハイパスフィルタ16からの出力は、除算器18において、ローパスフィルタ17からの出力と除算されて出力される。したがって、除算器18の出力は、ハイパスフィルタ16で抽出された交流成分ACを、ローパスフィルタ17で抽出された直流成分DCによって除算した値( $AC/DC$ )となる。この $AC/DC$ 方式では、発光回路12の発光光量の変化、フォトダイオード14の受光感度変化及び光ファイバ8a・8b等の伝送路損失の変化などによる光量損失の影響を除去することができる。

【0039】上記の構成のセンサ部11においては、後述のように、ポッケルス素子4と検光子5との位置関係によって光電圧センサ10の変調感度が変化し、これらがある一定の位置関係を持つときに変調感度が最大となる。

【0040】尚、ポッケルス素子4として用いられる電気光学結晶には、旋光性を有さない結晶( $Bi_4Ge_3O_{12}$ 、 $LiNbO_3$ 等)と、自然旋光性を有する結晶( $Bi_{12}GeO_{20}$ や $Bi_{12}SiO_{20}$ 等)とがあり、変調感度が最大となるポッケルス素子4と検光子5との位置関係は、ポッケルス素子4の旋光性の有無によって異なる。

【0041】但し、ポッケルス素子4が旋光性を持つ場合もそうでない場合も、変調感度が最大となる位置から、検光子5を光の進行方向を中心として以下に説明する所定方向に所定の角度だけ回転させると、光電圧センサ10の温度特性を改善することができる。

【0042】ここでは、まず、旋光性を持たないポッケルス素子4について説明する。

【0043】例えば、 $Bi_4Ge_3O_{12}$ 結晶は、結晶点群 $T_d$ (国際記号 $\bar{4}3m$ )の結晶であり、光学的に等方性の等軸晶系に属する。また、 $LiNbO_3$ 結晶は、結晶点群 $C_{3v}$ (国際記号 $3m$ )の三方晶系に属し、1軸性結晶である。ポッケルス素子4をなすこれらの電気光学結晶は、結晶表面とその結晶軸とが平行になるように軸出しされている。

【0044】ここで、x軸、y軸、z軸からなる直交座標系において、ポッケルス素子4の結晶軸をそれぞれ直交座標系のx軸、y軸、z軸の方向と一致させて考える。例えば、 $Bi_4Ge_3O_{12}$ 結晶の各結晶軸 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ をそれぞれ直交座標系のx軸、y軸、z軸と一致させる。

【0045】そして、上記電気光学結晶の表面には、z軸と平行な方向からの光が垂直に入射すると共に、当該結晶には光の進行方向に測定対象の印加電圧に応じた電界 $E(0, 0, E_z)$ がかけられる。

【0046】上記 $\lambda/4$ 板3は、そのc軸(光学軸)及びa軸が当該波長板結晶表面に平行であり、c軸が上記x軸に対して $45^\circ$ 傾けられて配されている。また、偏光子2は、その偏光方向が上記x軸方向と平行になるように配されており、これによって偏光子2を通過した直線偏光が $\lambda/4$ 板3の光学軸(c軸)に対して $45^\circ$ の角度で入射する。

【0047】また、検光子5の偏光方向は、図3に示すように上記x軸と平行(偏光子2の偏光方向もx軸と平行の場合、いわゆる平行偏光子)か、又は図示しないが上記y軸と平行(偏光子2の偏光方向がx軸と平行の場合、いわゆる直交偏光子)にすることによって、変調感度が最大となる。即ち、旋光性を持たないポッケルス素子4を使用する場合、ポッケルス素子4の結晶軸と検光子5の偏光方向を一致させるような位置関係とすることによって、変調感度が最大となるのである。

【0048】そして、図1に示すように、温度変化によって $\lambda/4$ 板3における基準温度での位相差 $90^\circ$ が減少する場合(例えば $90^\circ \rightarrow 89^\circ$ )には、検光子5

を、上記の変調感度が最大となる位置から、後述する所定方向に角度 $\alpha$ だけ回転させることによって、光電圧センサ10の温度特性を改善することができる。また、温度変化によって $\lambda/4$ 板3における基準温度での位相差 $90^\circ$ が増加する場合（例えば $90^\circ \rightarrow 91^\circ$ ）には、検光子5を、上記の変調感度が最大となる位置から、上記とは逆方向に角度 $\alpha$ だけ回転させることによって、光電圧センサ10の温度特性を改善することができる。上記の角度 $\alpha$ としては、後述のように約 $30^\circ$ 以内の範囲が好ましく、より好ましいのは約 $20^\circ \pm 10^\circ$ の範囲であり、最も好ましいのは約 $10^\circ \sim 20^\circ$ の範囲である。

【0049】尚、ここでは、回転方向を示す場合、光の進行方向の上流側から下流に向かって見た場合の方向を示すものとする。また、右方向（時計まわり）の回転を正（+）、左方向（反時計まわり）の回転を負（-）として記載する。

【0050】上記のように検光子5の位置を調整することによって温度特性が改善される理由を、以下に説明する。

【0051】図3に示すような平行偏光子の構成のセンサ部11において、温度変化によって $\lambda/4$ 板3の基準温度における位相差 $90^\circ$ に $\pm \Delta$ の変化が生じた場合を想定し、センサ部11の出射光のAC成分とDC成分がどの様になるかを考える。前述のように、偏光子2を通過した入射光 $I_0$ は、 $\lambda/4$ 板3を通過する際にc軸方向に振動する $I_0$ 成分とa軸方向に振動する $I_0$ 成分とに分離し、当該 $\lambda/4$ 板3を出る時には $90^\circ$ の位相差が与えられ、その出射光は円偏光となるはずである（図4のa1参照）。

$$\varepsilon = \{ (a - b) / a \} \times 100$$

で与えられる。

【0055】

\*【0052】しかし、温度変化によって $\lambda/4$ 板3の基準温度における位相差が $90^\circ$ から $\pm \Delta$ だけ偏移すると、図4において参照符号a2、a3で示すように、該 $\lambda/4$ 板3からの出射光は、x軸上に長軸又は短軸を有する楕円偏光となる。この状態でポッケルス素子4に電圧が印加されると、検光子5をx軸上（又はy軸上）に置いた位置で検光子5の出射光の振幅が最大となる振幅変調となる。

【0053】上記において、 $\lambda/4$ 板3の基準温度における位相差 $90^\circ$ からの偏移量 $\Delta$ を $1^\circ$ とし、また検光子5の偏光方向と上記x軸とのなす角度を様々に変化（ $+30^\circ$ 、 $+20^\circ$ 、 $+15^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $-15^\circ$ 、 $-20^\circ$ 、 $-30^\circ$ ）させて、センサ部11の出射光のAC成分とDC成分がどの様になるかを計算した。尚、感度最大の位置から検光子5を $\pm 45^\circ$ だけ回転させると、後述のように感度が略0となるので、ここでは、検光子5の回転角度を $-45^\circ \sim +45^\circ$ の範囲で考える。

【0054】上記の計算結果を表1に示す。尚、同表中の値は、変調度 $m=2$ （%）一定としたときの計算結果である。また、検光子5の位置が $0^\circ$ であり、且つ、 $\lambda/4$ 板3の位相差とポッケルス素子4のポッケルス効果による位相差とを合わせて考えた位相差が $90^\circ$ のときの検光子5の出射光量を1とした。また、AC成分とは、出射光量の振幅の最大値と最小値との差であり、DC成分とは、上記振幅の最大値と最小値とを加算して2で割った値である。また、比誤差 $\varepsilon$ は、基準温度における位相差 $90^\circ$ のときのAC成分、DC成分、AC/DCを基準値aとし、位相差が変化したときのそれらの値をbとすると、

$$\dots (4)$$

【表1】

検光子の 角度〔°〕	位相差 〔°〕	A C 成分	D C 成分	比誤差 $\varepsilon$ 〔%〕		
				A C	D C	AC/DC
+ 3 0	8 9	0.0178923	1.00444	+0.391	+0.467	+0.104
	9 0	0.0178277	0.999773	—	—	—
	9 1	0.0180537	0.995457	+1.296	-0.432	+1.735
+ 2 0	8 9	0.0269384	1.00666	+0.113	+0.684	-0.567
	9 0	0.0269081	0.999825	—	—	—
	9 1	0.0273061	0.993106	+1.479	-0.672	+2.166
+ 1 5	8 9	0.0302923	1.00748	+0.023	+0.762	-0.730
	9 0	0.0302854	0.999857	—	—	—
	9 1	0.0307583	0.992224	+1.561	-0.763	+2.340
0	8 9	0.0345935	1.00853	-0.892	+0.868	-1.745
	9 0	0.0349047	0.999848	—	—	—
	9 1	0.0352026	0.991086	+0.853	-0.876	+1.745
- 1 5	8 9	0.0296923	1.00734	-1.770	+0.745	-2.497
	9 0	0.0302273	0.999886	—	—	—
	9 1	0.0301398	0.992382	-0.289	-0.750	+0.464
- 2 0	8 9	0.0261656	1.00648	-2.137	+0.657	-2.775
	9 0	0.0267369	0.999911	—	—	—
	9 1	0.0265123	0.993308	-0.840	-0.660	-0.181
- 3 0	8 9	0.0168465	1.00418	-3.461	+0.422	-3.867
	9 0	0.0174505	0.999962	—	—	—
	9 1	0.0169897	0.995727	-2.641	-0.424	-2.227

【0056】ところで、温度変化は、ポッケルス素子4への印加電圧の変化に比べて極めて遅く、 $\lambda/4$ 板3の位相差変化は、基本的にはDC成分の変化として現れる。しかし、 $\lambda/4$ 板3の位相差（光学バイアス量）の変化に伴って、上表1に示されるようにAC成分の変化も生じる。そして、このAC成分の変化量（すなわち比誤差）は、検光子5の位置（角度）によっても変化する。

【0057】一例として、 $\lambda/4$ 板3の位相差が $90^\circ$ から $91^\circ$ に変化した場合を見てみると、上表1に示すように、検光子5が $0^\circ$ の位置ではAC成分の比誤差は約+0.9%であるが、検光子5の位置を $-15^\circ$ にすると、同じ $1^\circ$ の位相差変化でもAC成分の比誤差は約-0.3%と非常に小さくなっている。

【0058】上表1の結果に基づいて、温度変化によって $\lambda/4$ 板3の基準温度における位相差が $90^\circ$ から $89^\circ$ に変化したときの、検光子5の角度と比誤差との関係をグラフ化したのが図5である。また、上記の位相差が $90^\circ$ から $91^\circ$ に変化した場合については図6に示している。

【0059】図5及び図6から明らかなように、AC成

分の比誤差は、 $\lambda/4$ 板3の位相差変化の方向に関わらず右上がりの傾きを持つ。また、図5に示すように、 $\lambda/4$ 板3の位相差がマイナス方向に変化（ $90^\circ \rightarrow 89^\circ$ ）する場合のAC成分の比誤差は、検光子5が $0^\circ$ の位置（変調感度最大の位置）でマイナスの値を示し、そこから検光子5をプラス方向に所定角度（ここでは約 $+15^\circ$ ）だけ回転させればAC成分の比誤差を略ゼロにすることができる。

【0060】一方、図6に示すように、 $\lambda/4$ 板3の位相差がプラス方向に変化（ $90^\circ \rightarrow 91^\circ$ ）する場合のAC成分の比誤差は、検光子5が $0^\circ$ の位置（変調感度最大の位置）でプラスの値を示し、そこから検光子5をマイナス方向に所定角度（ここでは $-10^\circ \sim -15^\circ$ ）だけ回転させればAC成分の比誤差を略ゼロにすることができる。

【0061】したがって、センサ部11の出射光のAC成分から印加電圧の測定値を得る方式の場合、上記のように $\lambda/4$ 板3の特性（位相差がプラス又はマイナスの何れの方

向に変化するのかという特性）に応じて、検光子5を変調感度最大の位置から所定方向に回転させると、 $\lambda/4$ 板3の位相差変化の影響を抑制し、センサの



温度特性を改善することができる。

【0062】また、伝送路上での光量損失の変動を抑制できるAC/DC方式(図2参照)の場合は、さらに、DC成分の比誤差を考慮する必要がある。

$$\begin{aligned} \varepsilon &= [ \{ (AC + \Delta a) / (DC + \Delta d) \} - (AC/DC) ] / (AC/DC) \\ &= \{ (\Delta a/AC) - (\Delta d/DC) \} / \{ 1 + (\Delta d/DC) \} \end{aligned}$$

… (5)

となる。1 + (Δd/DC) ≒ 1 とすると、

$$\varepsilon \approx (\Delta a/AC) - (\Delta d/DC) \quad \dots (6)$$

となる。すなわち、AC成分の比誤差-DC成分の比誤差≒AC/DCの比誤差となる。したがって、AC/DC方式の場合、AC成分の比誤差とDC成分の比誤差とを略同じにすれば、両方の誤差が相殺されてλ/4板3の位相差変化の影響を抑制することができる。この観点から図5及び図6を見てもみる。

【0064】図5及び図6から明らかなように、DC成分の比誤差に関しては、λ/4板3の位相差がマイナス方向に変化(90°→89°へ減少)する場合はプラスのオフセット、その位相差がプラス方向に変化(90°→91°へ増加)する場合はマイナスのオフセットが発生する。また、AC成分の比誤差に関しては上述の通りであり、したがって、図5に示すように、λ/4板3の位相差がマイナス方向に変化(90°→89°)する場合、検光子5を0°の位置(変調感度最大の位置)からプラス方向に回転させれば、AC成分の比誤差とDC成分の比誤差との差が小さくなり、AC/DCの比誤差を小さくすることができる。

【0065】一方、図6に示すように、λ/4板3の位相差がプラス方向に変化(90°→91°)する場合、検光子5を0°の位置(変調感度最大の位置)からマイナス方向に回転させれば、AC成分の比誤差とDC成分の比誤差との差が小さくなり、AC/DCの比誤差を小さくすることができる。

【0066】尚、上記とは逆方向に検光子5を回転させると、AC成分の比誤差とDC成分の比誤差との差が大きくなり、温度特性が悪くなってしまうので、検光子5の回転方向の設定は非常に重要である。

【0067】検光子5の回転の角度については、温度変化による誤差を抑えることと、感度最大の位置から余り大きくずれてしまうと必要な感度が得られなくなっ

\*【0063】まず、AC/DCの比誤差について考えると、比誤差εは上式(4)で与えられ、センサ出力がAC/DCで処理される場合には、AC成分の変動をΔa、DC成分の変動をΔdとすると、

まうことを考えると、感度最大の位置より約30°以内の範囲で回転させることが好ましい。また、感度最大の位置(0°)と感度最小の位置(+45°又は-45°)との略中間の位置(約20°)において温度特性の改善効果が高いので、感度最大の位置より約20°±10°の範囲で検光子5を回転させることがより好ましい。また、約10°～約20°の範囲で検光子5を回転させた場合、感度の低下が比較的少なく且つ温度特性の改善効果も高いので、この角度範囲に設定することが最も好ましい。

【0068】勿論、上記の検光子5の回転方向や回転角度については、λ/4板3の位相差の偏移量が±1°のときだけに適用されるのではなく、λ/4板3の位相差の変化の方向が上記と同様であれば、同様のことが言える。

【0069】ところで、上記では検光子5をx軸上に置いた位置(0°)を基準としたが、そこから±90°回転させたy軸上に検光子5を置いた場合(直交偏光子の構成)でもやはり変調感度は最大となる。そこで、次に、直交偏光子の構成のセンサ部11において、温度変化によってλ/4板3の基準温度における位相差90°に±Δの変化が生じた場合を想定し、センサ部11の出射光のAC成分とDC成分がどの様になるかを考える。上記と同様に偏移量Δを1°とし、また検光子5の偏光方向と上記y軸とのなす角度を様々に変化(+30°、+20°、+15°、0°、-15°、-20°、-30°)させて、センサ部11の出射光のAC成分、DC成分、AC/DCの比誤差を上記と同様にして計算した。この計算結果を表2に示す。

【0070】

【表2】

検光子の 角度〔°〕	位相差 〔°〕	A C 成分	D C 成分	比誤差 $\varepsilon$ 〔%〕		
				A C	D C	AC/DC
+ 3 0	8 9	0.0180538	0.995457	+1.306	-0.469	+1.783
	9 0	0.0178211	1.00015	—	—	—
	9 1	0.0178924	1.00444	+0.400	+0.429	-0.029
+ 2 0	8 9	0.0273061	0.993106	+1.479	-0.689	+2.200
	9 0	0.0269035	0.999994	—	—	—
	9 1	0.0269383	1.00666	+0.129	+0.667	-0.534
+ 1 5	8 9	0.0307583	0.992224	+1.568	-0.767	+2.356
	9 0	0.0302833	0.999914	—	—	—
	9 1	0.0302924	1.00748	+0.030	+0.757	-0.721
0	8 9	0.0352027	0.991086	+0.853	-0.876	+1.745
	9 0	0.0349048	0.999848	—	—	—
	9 1	0.0345936	1.00853	-0.892	+0.868	-1.745
- 1 5	8 9	0.0301394	0.992382	-0.290	-0.750	+0.464
	9 0	0.0302271	0.999886	—	—	—
	9 1	0.0296920	1.00734	-1.770	+0.745	-2.497
- 2 0	8 9	0.0265121	0.993308	-0.840	-0.660	-0.181
	9 0	0.0267368	0.999911	—	—	—
	9 1	0.0261654	1.00648	-2.137	+0.657	-2.776
- 3 0	8 9	0.0169895	0.992224	-2.641	-0.769	-1.886
	9 0	0.0174503	0.999914	—	—	—
	9 1	0.0168464	1.00748	-3.461	+0.757	-4.186

【0071】上表2の結果に基づいて、温度変化によって $\lambda/4$ 板3の基準温度における位相差が $90^\circ$ から $89^\circ$ に変化したときの、検光子5の角度と比誤差との関係をグラフ化したのが図7である。また、上記の位相差が $90^\circ$ から $91^\circ$ に変化した場合については図8に示している。

【0072】直交偏光子を基準とした図7と、先の平行偏光子を基準とした図6とを比べると、位相差の変化の方向が一方は減少方向で他方は増加方向であるが、略同様の特性を示していることが分かる。これは、次の説明により容易に理解できる。

【0073】すなわち、 $\lambda/4$ 板3の位相差が $90^\circ + \Delta$ に増加した場合に $\lambda/4$ 板3から出射する楕円偏光の長軸と、その位相差が $90^\circ - \Delta$ に減少した場合に $\lambda/4$ 板3から出射する楕円偏光の長軸とは、図4に示すように $90^\circ$ 異なる。図6のように $\lambda/4$ 板3の位相差が増加する方向で光学バイアス量が増加した場合、図4のようにx軸上に長軸を有する楕円偏光が $\lambda/4$ 板3から出力されるとすると、平行偏光子の場合は当該楕円偏光（印加電圧0Vのときに検光子5に入射する基準の楕円偏光）の長軸上に検光子5（その偏光方向）が配置され

ることになる。一方、図7のように $\lambda/4$ 板3の位相差が減少する方向で光学バイアス量が増加した場合、x軸上に短軸、y軸上に長軸を有する楕円偏光が $\lambda/4$ 板3から出力されることになるが、直交偏光子の場合はy軸上に検光子5（その偏光方向）があるので、やはり基準の楕円偏光の長軸上に検光子5が配置されることになる。したがって、図6と図7との特性が略同様になるのである。

【0074】また、直交偏光子を基準とした図8と、先の平行偏光子を基準とした図5とを比べると、位相差の変化の方向が逆であるが、略同様の特性を示している。これも、上記と同様の理由により容易に理解できる。

【0075】以上の説明をまとめると、温度特性を良好とするためには、 $\lambda/4$ 板3の位相差の変化の方向に応じて、変調感度最大の位置からの検光子5の回転方向を決定する必要があり、そして、変調感度が最大となる検光子5の位置は複数（x軸に対して $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$ ）あり、x軸に対して $0^\circ$ 又は $180^\circ$ の位置を基準とするか、 $90^\circ$ 又は $270^\circ$ の位置を基準とするかによって、基準とする変調感度最大の位置からの検光子5の回転方向が決まるということである。

【0076】具体的には、検光子5を変調感度最大の位置（基準位置）においた場合であって、温度変化による $\lambda/4$ 板3の位相差の偏移により検光子5の出力のDC成分の比誤差が一となる場合には、基準位置より、マイナス方向（左まわり方向）に検光子を回転させると、AC/DCの比誤差が小さくなり、温度特性を改善することができる。また、温度変化による $\lambda/4$ 板3の位相差の偏移により検光子5の出力のDC成分の比誤差が+となる場合には、上記基準位置より、プラス方向（右まわり方向）に検光子を回転させると、AC/DCの比誤差が小さくなり、温度特性を改善することができる。

【0077】ところで、 $\lambda/4$ 板3の特性として、基準温度での位相差からずれる方向は、常に一定でなければならないが、以下のように $\lambda/4$ 板3を設計することによってこれが可能となる。

【0078】すなわち、 $\lambda/4$ 板3の位相差 $\delta a$ は、温度係数 $\beta a$ を用いて上式（3）に示す通り、 $\delta a = \delta o (1 + \beta a \cdot T a)$ で表される。温度係数 $\beta a$ は $\lambda/4$ 板3に固有の値であり、 $\lambda/4$ 板3として使用する結晶が正結晶、即ちa軸方向の屈折率 $n_a$ 。（＝常光線屈折率 $n_o$ ）とc軸方向の屈折率 $n_c$ 。（＝異常光線屈折率 $n_e$ ）の関係が $n_a > n_c$ の結晶の場合には、温度係数 $\beta a$ が負の値をとる。また、 $\lambda/4$ 板3として正結晶（ $n_a < n_c$ ）を使用した場合は、温度係数 $\beta a$ が正の値をとる。

【0079】 $\lambda/4$ 板3の温度係数 $\beta a$ が負の値であれば、温度の上昇と共に位相差 $\delta a$ は減少するので、センサ部11の使用温度範囲を $T_{bott} \sim T_{top}$ とすると、最低温度 $T_{bott}$ 以下の温度を基準温度としてその温度条件で位相差 $\delta o$ が $90^\circ$ になるように設定すれば、この $\lambda/4$ 板3は使用温度範囲で常に $90^\circ$ 以下の位相差を持つことになる。また、使用温度範囲の最高温度 $T_{top}$ 以上の温度を基準温度としてその温度条件で位相差 $\delta o$ が $90^\circ$ になるように設定すれば、この $\lambda/4$ 板3は使用温度範囲で常に $90^\circ$ 以上の位相差を持つことになる。

【0080】また、 $\lambda/4$ 板3の温度係数 $\beta a$ が正の値であれば、温度の上昇と共に位相差 $\delta a$ は増加するので、上記とは逆に、最低温度 $T_{bott}$ 以下の温度で位相差 $\delta o$ が $90^\circ$ になるように設定すれば、使用温度範囲で常に $90^\circ$ 以上の位相差を持ち、最高温度 $T_{top}$ 以上の温度で位相差 $\delta o$ が $90^\circ$ になるように設定すれば、使用温度範囲で常に $90^\circ$ 以下の位相差を持つ $\lambda/4$ 板3となる。このようにして、基準の位相差 $90^\circ$ から変化する方向が一定となる $\lambda/4$ 板3を作成することができる。

【0081】尚、表1及び表2の計算は、変調度 $m$ を一定（ $m = 2\%$ ）とし、あくまで温度変化によって $\lambda/4$ 板3の位相差が変化したときの影響のみを調べたシミュレーションである。したがって、実際のセンサ部11の出力には、温度変化によってポッケルス素子4で生じる

誤差（主に、電気光学効果の変化に伴うAC成分の変化）も含まれるが、温度変化によって $\lambda/4$ 板3に生じる誤差は比較的大きく、検光子5の回転によってこの $\lambda/4$ 板3の誤差の影響を少なくすることは、温度特性の改善には非常に有効である。このことを検証するために、ポッケルス素子4として $Bi_{12}GeO_{20}$ 結晶を使用し、使用温度範囲を $-20^\circ \sim 60^\circ$ として温度特性試験を行った。検光子5を $0^\circ$ （感度最大の位置）に置いた場合と、上述の温度特性を改善することができる方向に $10^\circ$ 回転させた場合とで、AC/DCの比誤差を実測したが、上記 $0^\circ$ の位置では最大比誤差の絶対値が2.58であったのに対し、そこから $10^\circ$ 回転させた位置では最大比誤差の絶対値が0.71と十分に小さくなった。

【0082】〔実施の形態2〕本発明のその他の実施の一形態について、主に図9ないし図19に基づいて説明すれば、以下の通りである。尚、説明の便宜上、前記実施の形態にて示した部材と同一の機能を有する部材には、同一の参照符号を付記し、その説明を省略する。

【0083】本実施の形態では、ポッケルス素子4として自然旋光性を有する結晶（ $Bi_{12}GeO_{20}$ や $Bi_{12}SiO_{20}$ 等）を用いた場合について説明する。

【0084】旋光性を有するポッケルス素子4の場合も、旋光性のない場合と同様に、検光子5を、変調感度最大の位置から $\lambda/4$ 板3の特性（位相差の変化する方向）に応じた方向に角度 $\alpha$ だけ回転させれば、温度特性を改善することが出来る。旋光性の有無によって異なるのは、変調感度が最大となる検光子5の位置だけである。

【0085】そこで、まず、変調感度が最大となるポッケルス素子4と検光子5との位置関係について説明する。

【0086】ここでは、旋光性を有するポッケルス素子4の一例として、 $Bi_{12}GeO_{20}$ 結晶を用いて説明する。 $Bi_{12}GeO_{20}$ 結晶は、結晶点群T（国際記号23）の結晶であり、等軸晶系に属する。ポッケルス素子4をなす $Bi_{12}GeO_{20}$ 結晶は、結晶表面と $Bi_{12}GeO_{20}$ の結晶軸とが平行になるように軸出しされている。

【0087】図9に示すように、ポッケルス素子4をなす $Bi_{12}GeO_{20}$ 結晶の各結晶軸 $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 010 \rangle$ 、 $\langle 001 \rangle$ と平行な軸をそれぞれ直交座標系のx軸、y軸、z軸とする。尚、等軸晶系に属する $Bi_{12}GeO_{20}$ 結晶に電圧が印加されていない状態においては、 $Bi_{12}GeO_{20}$ 結晶の屈折率楕円体は球形である。この $Bi_{12}GeO_{20}$ 結晶のz方向の中間点における屈折率楕円体の主軸（X軸、Y軸、Z軸）は、 $Bi_{12}GeO_{20}$ 結晶の各結晶軸と平行な上記x軸、y軸、z軸と一致する。

【0088】そして、上記 $Bi_{12}GeO_{20}$ 結晶の表面には、z軸と平行な方向からの光が垂直に入射すると共

に、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶には光の進行方向に測定対象の印加電圧に応じた電界  $E(0, 0, E_z)$  がかけられる。

【0089】 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶の光の進行方向（ $z$  軸方向）の厚さを  $b$  (mm)、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶の旋光能を  $\theta$  ( $^\circ/\text{mm}$ ) とすると、当該  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶を通過する光の振動面は、 $\theta \times b$  で与えられる角度  $\phi$  ( $^\circ$ ) だけ回転する。以下、上記の  $\phi$  を旋光角と称する。旋光角  $\theta$  は、個々の結晶に特有の値であり、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶の場合、入射光の波長が  $800\text{nm} \sim 900\text{nm}$  のときには  $\theta \approx 10.5^\circ/\text{mm}$  である。この場合、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶の  $z$  軸方向の厚さ  $b$  を例えば約  $3\text{mm}$  にすれば、旋光角  $\phi \approx 30^\circ$  となり、また、上記厚さ  $b$  を約  $5.7\text{mm}$  にすれば旋光角  $\phi \approx 60^\circ$  となる。尚、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶の場合は、正方向（光の進行方向の上流側から下流に向かって見た場合に右方向）に光の振動面が回転する。

【0090】そして、上記  $x$  軸方向に対して、結晶の旋光性によって偏光面が回転する方向と同一方向に旋光角  $\phi$  の約半分の角度（ $\approx \phi/2$ ）だけ傾いた位置に検光子 5（その偏光方向）を配することによって、最大感度が得られる。一例を示すと、上記のような厚さ  $b \approx 3\text{mm}$  の  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶の場合は、旋光角  $\phi \approx +30^\circ$  なので、 $x$  軸に対して検光子 5（その偏光方向）を右に約  $15^\circ$  傾ければよい。また、厚さ  $b \approx 5.7\text{mm}$  の  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶の場合は、旋光能による回転角度  $\phi \approx +60^\circ$  なので、 $x$  軸に対して検光子 5（その偏光方向）を右に約  $30^\circ$  傾ければよい。このように、ポッケルス素子 4 の旋光角に応じてポッケルス素子 4 と検光子 5 との位置関係を定めることにより、変調感度を最大にする

ことができる。

\*

【0091】また、ポッケルス素子 4 に対する上記偏光子 2 や  $\lambda/4$  板 3 の位置が変化しても（換言すれば、偏光子 2 の偏光方向及び  $\lambda/4$  板 3 の  $c$  軸と上記  $x$  軸とのなす角度が変わっても）、上述のように検光子 5 を  $x$  軸に対して約  $\phi/2$  だけ傾けた位置で変調感度が最大となる。すなわち、変調感度を最大にするためには、ポッケルス素子 4 と検光子 5 との位置関係が重要なのである。このことを確かめるため、以下に示す実験を行った。

【0092】図 9 に示すようにコリメータ 1、偏光子 2、 $\lambda/4$  板 3、ポッケルス素子 4、検光子 5、コリメータ 6 を順に並べ、安定化光源より約  $850\text{nm}$  の波長の光を出力する。ポッケルス素子 4 としては厚さ  $b \approx 3\text{mm}$  の  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶を使用し、このポッケルス素子 4 の光の進行方向に、安定した  $50\text{V}$  の交流電圧を印加する。そして、検光子 5 及びコリメータ 6 を通過して光ファイバ 8 b に導かれる光に対して、光/電気変換（ $O/E$  変換）を施した後、その AC 成分及び DC 成分を測定する。

【0093】 $\lambda/4$  板 3 の  $c$  軸とポッケルス素子 4 の結晶軸（ $x$  軸）との関係は図 1 に示す通り  $\lambda/4$  板 3 の  $c$  軸を  $x$  軸に対して  $45^\circ$  に傾けたまま一定とし、偏光子 2 の偏光方向と  $x$  軸とのなす角度が、 $-60^\circ$ 、 $-45^\circ$ 、 $-30^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $+30^\circ$ 、 $+45^\circ$ 、 $+60^\circ$  となるように偏光子 2 の位置を変化させる（ $z$  軸を中心として偏光子 2 を回転させる）。そして、偏光子 2 を上記の各位置に配した場合に、 $z$  軸を中心として検光子 5 を回転させながら、センサ出力の AC 値が最大になる検光子 5 の位置（検光子 5 の偏光方向と  $x$  軸とのなす角度）を調べる。この実験結果を下表 3 に示す。

【0094】

\*

【表 3】

偏光子の位置 【度】	AC 値が最大となる 検光子の位置【度】	AC 値 (max) 【mV】	DC 値 【mV】
-60	+15	46	873
-30	+15	52	857
0	+15	99	593
+30	+15	49	354
+60	+15	52	354
+45	+15	5 (感度略 0)	325
-45	+15	6 (感度略 0)	610

【0095】尚、参考として、偏光子 2 及び検光子 5 の偏光方向を何れも  $x$  軸に対して  $0^\circ$  として（いわゆる平行偏光子であり従来の構成）センサ出力の AC 値を測定したが、その値は  $87\text{mV}$  であった。また、旋光性のポッケルス素子 4 を使用した場合に最大感度を得るには、直感的には、従来の構成より検光子 5 を  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶の旋光角  $\phi$  と同じだけ（ $+30^\circ$ ）傾ければよいように思われる。しかし、検光子 5 を  $+30^\circ$  傾けた場合

のセンサ出力の AC 値は、表 3 に示すとおり  $49\text{mV}$  であった。上記の平行偏光子の場合及び検光子 5 を旋光角  $\phi$  と同じだけ傾けた場合の AC 値は、検光子 5 の偏光方向を  $x$  軸に対して  $+15^\circ$ （厚さ  $b \approx 3\text{mm}$  の  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  結晶の旋光角の半分）傾けた場合の AC 値（ $99\text{mV}$ ）よりも小さくなっている。

【0096】また、表 1 に示すように、偏光子 2 の位置を変化させても、センサ出力の AC 値（AC 成分の振

幅)が最大(すなわち変調感度が最大)となるのは、検光子5の偏光方向をx軸に対して $+15^\circ$ (厚さ $b \approx 3\text{ mm}$ の $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 結晶の旋光角の半分)だけ傾けた場合である。尚、変調感度が最大となる検光子5の位置から $\pm 90^\circ \times n$ 回転した位置に検光子5を配した場合も、同様に変調感度が最大となる。

【0097】これに対して、検光子5をAC値が最大となる上記の位置から $\pm 45^\circ$ 回転させた位置に配すると、偏光子2の位置(角度)を変化させても常にAC値が略0となることも確認した。

【0098】すなわち、ポッケルス素子4の旋光角が $\phi$ ( $^\circ$ )であれば、検光子5の偏光方向をx軸に対して、 $(\phi/2) \pm 90^\circ \times n$  ( $n$ は整数)

だけ傾ければ変調感度が最大となり、一方、検光子5の偏光方向をx軸に対して、

$(\phi/2) \pm 45^\circ \pm 90^\circ \times n$  ( $n$ は整数)

だけ傾ければ変調感度が最小となる。

【0099】ところで、上記の実験において、偏光子2の偏光方向をx軸に対して $0^\circ$ (尚、 $0^\circ \pm 90^\circ \times n$ でも同じ)に配した場合、 $\lambda/4$ 板3にはそのc軸に対して $45^\circ$ の角度で直線偏光が入射されるので、 $\lambda/4$ 板3の出力が円偏光となり、この場合に偏光子2を他の位置(角度)に配するよりも変調感度が良くなっている(表1においてAC値(max)は99mV)。

【0100】また、偏光子2の偏光方向をx軸に対して $\pm 45^\circ$ (尚、 $45^\circ \pm 90^\circ \times n$ でも同じ)に配した場合、 $\lambda/4$ 板3にはそのc軸と平行又は垂直に直線偏光が入射されるので、 $\lambda/4$ 板3を通過する光が異常光線と常光線とに分解されることがなく(すなわち位相差を生じることがなく)、 $\lambda/4$ 板3の出力は直線偏光のままであり、この場合にはAC値も殆ど0となる。

【0101】また、偏光子2の偏光方向を、x軸に対して $0^\circ$ 及び $\pm 45^\circ$ 以外の角度で傾けた場合、 $\lambda/4$ 板3の出力はその角度に応じた楕円率の楕円偏光となる

(その角度が $0^\circ$ に近いほど楕円率は小さくなる)。 $\lambda/4$ 板3が正確に $90^\circ$ の位相差を生じさせるのであれば、 $\lambda/4$ 板3から出力される楕円偏光の長軸・短軸は $\lambda/4$ 板3のc軸と平行又は直交し、当該楕円偏光の楕円率が大きくなると共にAC値が小さくなる。

【0102】したがって、偏光子2と $\lambda/4$ 板3との関係では、偏光子2の偏光方向を $\lambda/4$ 板3のc軸に対して $45^\circ$ 傾け、 $\lambda/4$ 板3の出力が円偏光となるようにすることが、変調感度向上のためには望ましいと言える。

【0103】また、旋光角 $\phi$ が上記とは異なるポッケルス素子4(厚さ $b \approx 5.7\text{ mm}$ の $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 結晶)を使用し、上記と同様の実験を行った。この場合も、上記と同様に、偏光子2の位置を変化させても、センサ出力のAC値が最大となるのは、検光子5の偏光方向をx軸に対して旋光角 $\phi$ の半分(この場合 $+60^\circ/2 = +$

$30^\circ$ )だけ傾けた場合であった。

【0104】ところで、上記の実験では、 $\lambda/4$ 板3のc軸とポッケルス素子4の結晶軸(x軸)との関係は一定( $45^\circ$ )であった。そこで、以下の実験では、 $\lambda/4$ 板3のc軸とx軸との角度を変化させ、最大感度が得られる条件を調べた。

【0105】(1)まず、図10に示すように、 $\lambda/4$ 板3のc軸をx軸に対して $45^\circ$ 傾けると共に、偏光子2の偏光方向をx軸に対して $-10^\circ$ 傾ける。

10 【0106】(2)ポッケルス素子4は光路から取り除いて、偏光子2と検光子5との間には $\lambda/4$ 板3のみが存在する状態にする。

【0107】(3)検光子5の位置を $0^\circ \sim -170^\circ$ まで $10^\circ$ 刻みで変化させ、そのときのDC値を読み取って $\lambda/4$ 板3から出力される楕円偏光の状態をみる。

【0108】ここまでの操作によって得られた楕円偏光の状態を図11中に一点鎖線で示している。この場合、偏光子2が $\lambda/4$ 板3のc軸よりもa軸側に傾いているので、a軸上に長軸を持つ楕円偏光となる。

20 【0109】(4)次に、上記(1)の状態において、ポッケルス素子4(厚さ $b \approx 5.7\text{ mm}$ の $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 結晶を使用)を $\lambda/4$ 板3と検光子5との間に挿入する。この場合、図9に示すように、ポッケルス素子4の各結晶軸をx軸、y軸、z軸に一致させる。そして、この状態で、上記(3)と同様に検光子5の位置を $10^\circ$ 刻みで変化させ、そのときのDC値を読み取ってポッケルス素子4から出力される楕円偏光の状態をみる。尚、ここではポッケルス素子4に電圧は印加しない。

30 【0110】上記の操作によって得られた楕円偏光の状態を図11中に実線で示している。この楕円偏光は、上記(3)で得られた $\lambda/4$ 板3のみの場合の楕円偏光と略同じ楕円率であり(楕円偏光の形が保存されており)、その長軸がポッケルス素子4の旋光角 $\phi \approx +60^\circ$ だけ回転したものとなっている。

【0111】(5)次に、上記ポッケルス素子4に安定した50Vの交流電圧を光の進行方向に印加し、z軸を中心として検光子5を回転させながら、センサ出力のAC値が最大になる検光子5の位置(検光子5の偏光方向とx軸とのなす角度)を調べる。

40 【0112】上記の操作の結果、図11に示すように、AC値が最大となる検光子5の位置は、その偏光方向とx軸とのなす角度が $+30^\circ$ (すなわち、旋光角 $\phi$ の半分) $\pm 90^\circ \times n$ であり、AC値(max)は83mVであった。

【0113】(6)次に、図12に示すように、 $\lambda/4$ 板3のc軸をx軸に対して $35^\circ$ 傾けると共に、偏光子2の偏光方向をx軸に対して $-20^\circ$ 傾ける(偏光子2の偏光方向と $\lambda/4$ 板3のc軸とは、上記(1)と同様に $55^\circ$ の角度を有する)。

50 【0114】(7)上記の状態において、上記(3)～

(5)と同様の操作を行う。

【0115】上記の操作の結果を図13に示している。上記(1)～(5)の実験と比べると $\lambda/4$ 板3を $-10^\circ$ 回転させたためにポッケルス素子4への入射角(楕円偏光の長軸とポッケルス素子4のx軸とのなす角度)が変化しているが、旋光能による回転角度は $+60^\circ$ と変化はない。また、この場合も、AC値が最大となる検光子5の位置は、その偏光方向とx軸とのなす角度が $+30^\circ$ (すなわち、旋光角 $\phi$ の半分) $\pm 90^\circ \times n$ であり、AC値(max)は82mVであった。この結果から、 $\lambda/4$ 板3のc軸とポッケルス素子4のx軸とのなす角度が変化しても、検光子5の偏光方向を、 $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 結晶のx軸に対して、ポッケルス素子4の旋光角 $\phi$ の半分だけ傾ければ、常に変調感度が最大となることがわかる。

【0116】(8)次に、図14に示すように、 $\lambda/4$ 板3のc軸をx軸に対して $35^\circ$ 傾けると共に、偏光子2の偏光方向をx軸に対して $-10^\circ$ 傾ける(偏光子2の偏光方向と $\lambda/4$ 板3のc軸とは $45^\circ$ の角度となる)。

【0117】(9)上記の状態において、上記(3)～(5)と同様の操作を行う。

【0118】上記の操作の結果を図15に示している。尚、 $\lambda/4$ 板3の出力は円偏光となるはずであるが、これが僅かに楕円偏光になっているのは、偏光子2や $\lambda/4$ 板3の僅かな位置ずれ等が原因と思われる。この場合も、やはり、AC値が最大となる検光子5の位置は、その偏光方向とx軸とのなす角度が $+30^\circ$ (すなわち、旋光角 $\phi$ の半分) $\pm 90^\circ \times n$ であり、AC値(max)は89mVであった。

【0119】上記の各実験結果から、偏光子2の偏光方向及び $\lambda/4$ 板3のc軸と、ポッケルス素子4の結晶軸(上記x軸)とのなす角度が変わっても、常に、検光子5をx軸に対して旋光角 $\phi$ の約半分だけ傾けた位置で変調感度が最大となることがわかる。このようなポッケルス素子4と検光子5との位置関係によって変調感度が最大となるのは、以下の理由によるものと考えられる。

【0120】まず、図3に示すように、旋光性を有さない電気光学結晶( $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 、 $\text{LiNbO}_3$ 等)からなるポッケルス素子4を使用した平行偏光子の構成を考えてみる。尚、ポッケルス素子4として使用される電気光学結晶の屈折率楕円体(電圧を印加していない場合の屈折率楕円体)の主軸(X軸、Y軸、Z軸)は、図9に示した上記の座標軸x、y、zと一致している。

【0121】上記のポッケルス素子4に、光の進行方向(z軸方向)に電圧を印加すれば、当該印加電圧に応じて電気光学結晶の屈折率楕円体は変形する。具体的には、上記電気光学結晶が $\text{LiNbO}_3$ のような一軸性結晶であった場合、電圧印加によって二軸性結晶となる。そして、図3に示すように、電圧未印加時の屈折率楕円

体の2本の主軸(X軸、Y軸)は、電圧印加によってx、y軸に対して $45^\circ$ 回転し、電圧印加時の屈折率楕円体の主軸(X'軸、Y'軸)となる。

【0122】電圧未印加時の屈折率楕円体の切断面(光の進行方向と垂直に原点を含めて切断した面)を図16(a)に、電圧印加時の屈折率楕円体の切断面を図16(b)にそれぞれ示す。図16(a)に示すように、電圧未印加でz軸方向の電界が0のとき、屈折率楕円体の主軸(X軸、Y軸)はx軸、y軸と一致し、主屈折率 $n_x$ 、 $n_y$ は等しい。図10(b)に示すように、電圧印加でz軸方向に電界がかけられると、屈折率楕円体の主軸(X'軸、Y'軸)はx軸、y軸と $45^\circ$ の角度をなし、主屈折率 $n_{x'}$ 、 $n_{y'}$ は、 $n_{x'} \neq n_{y'}$ となる。

【0123】屈折率楕円体の主軸は偏光の固有軸であるので、電圧が印加されたポッケルス素子4に入射した光は、互いに直交するX'軸方向及びY'軸方向に振動する2つの直線偏光に分解される。X'軸方向の主屈折率 $n_{x'}$ 及びY'軸方向の主屈折率 $n_{y'}$ は、ポッケルス素子4への印加電圧に比例して変化し、X'軸方向及びY'軸方向に振動する2つの直線偏光は、当該印加電圧に応じた位相差を生じてポッケルス素子4から出力される(すなわち位相変調が行われる)。

【0124】上記ポッケルス素子4の電気光学結晶は、旋光性を持たないので、当該結晶から出力される2つの直線偏光は、やはりX'軸方向及びY'軸方向に振動する光である。このポッケルス素子4を通過した振動方向が直交する2つの直線偏光は、合成されて印加電圧に応じた楕円偏光となる。ここで、例えば検光子5をx軸に対して $\pm 45^\circ$ 傾けて、検光子5の偏光方向をX'軸方向又はY'軸方向と一致させた場合は、センサの感度は最小となる。なぜならば、ポッケルス素子4の出力光は、X'軸方向及びY'軸方向に振動する光のベクトル和であるから、検光子5をX'軸又はY'軸と平行に配置した場合には光量変化が生じないためである。一方、検光子5の偏光方向を、X'軸方向又はY'軸方向に対して $45^\circ$ だけ傾ける、すなわち図3に示すように検光子5をx軸又はy軸と一致させた場合に、センサの感度は最大となる。

【0125】すなわち、旋光性を持たないポッケルス素子4を用いた場合、電圧印加時の屈折率楕円体における光の進行方向(z軸方向)と直交する2本の主軸(X'軸、Y'軸)に対して、検光子5が $45^\circ$ の角度をなすように配置すれば、最大感度が得られるのである。

【0126】ところで、図3に示すように、 $\lambda/4$ 板3のc軸(光学軸)とポッケルス素子4のX'軸とを平行にし、 $\lambda/4$ 板3のc軸に対して偏光子2を $45^\circ$ 傾けた場合では、旋光性を持たないポッケルス素子4の出力光は、x軸又はy軸上に長軸・短軸がある楕円偏光となる。このことと、検光子5をx軸と平行に配すれば最大感度が得られることとから考えて、一見、検光子5に

入力される楕円偏光の長軸・短軸と検光子5の偏光方向とを一致させた場合に、常に最大感度が得られるように思われるが、そうではない。最大感度は、あくまで、ポッケルス素子4のX'軸、Y'軸に対して45°の角度をなすように検光子5を配置した場合に得られるのである。

【0127】次に、図9に示すように、旋光性を有する電気光学結晶(Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>、Bi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>等)からなるポッケルス素子4を使用した構成を考えてみる。

【0128】上述のように、Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶やBi<sub>12</sub>SiO<sub>20</sub>結晶は等軸晶系に属し、その結晶軸は座標軸x、y、zと一致している。また、等軸晶系なので、電圧印加前のBi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶の屈折率楕円体は球形である。そして、このBi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶のz軸方向の中間点における屈折率楕円体の主軸(X軸、Y軸、Z軸)は、座標軸x、y、z軸と一致していると考えられる。

【0129】上記のポッケルス素子4に、光の進行方向(z軸方向)に電圧を印加すれば、当該印加電圧に応じてBi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶の屈折率楕円体は変形する。図17に示すように、旋光性を有するポッケルス素子4の場合、屈折率楕円体における光の進行方向(z軸方向)と直交する2本の主軸(X'軸、Y'軸)は、Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶における光の進行方向の位置によって、z軸に垂直な面内の角度が変化していると考えられる。

【0130】詳しくは、Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶のz軸方向の中間点において、電圧未印加時の屈折率楕円体の2本の主軸(X軸、Y軸)は、電圧印加によってx、y軸に対して45°回転すると考えられる。この中間点における屈折率楕円体の切断面(光の進行方向と垂直に原点を含めて切断した面)は、図18(b)のようになっていると思われる、電圧印加時の主軸(X'(mid)軸、Y'(mid)軸)は、x、y軸に対して45°の角度をなす。

【0131】また、Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶の光の入射面の位置においては、電圧印加時の屈折率楕円体の主軸(X'(in)軸、Y'(in)軸)は、上記中間点における主軸(X'(mid)軸、Y'(mid)軸)よりも、旋光方向とは逆方向に旋光角φの半分(-φ/2)だけz軸回りに回転した位置にあると考えられる。この入射面の位置における屈折率楕円体の切断面は、図18(a)のようになっていると思われる。

【0132】また、Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶の光の出射面の位置においては、電圧印加時の屈折率楕円体の主軸(X'(out)軸、Y'(out)軸)は、上記中間点における主軸(X'(mid)軸、Y'(mid)軸)よりも、旋光方向と同一方向に旋光角φの半分(+φ/2)だけz軸回りに回転した位置にあると考えられる。この出射面の位置における屈折率楕円体の切断面は、図18(c)のようになっていると思われる。

【0133】上記のように考えると、Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶の光の入射面から出射面までの間で、電圧印加時の屈

折率楕円体の主軸(X'軸、Y'軸)は、旋光角φだけ回転することになる。また、Bi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶の光の出射面の位置における屈折率楕円体の主軸(X'(out)軸、Y'(out)軸)に注目すると、旋光性を持たない電気光学結晶に電圧を印加したときの屈折率楕円体の主軸(X'軸、Y'軸)に対して、旋光角φの半分の角度だけ回転していることになる(図16(b)及び図18(c)参照)。

【0134】上記のポッケルス素子4を通過した2つの直線偏光は、出射面の位置における屈折率楕円体の主軸(X'(out)軸、Y'(out)軸)の方向に振動する光である。そして、互いに直交する方向に振動するこれら2つの直線偏光は、ポッケルス素子4を出射した後に合成されて印加電圧に応じた楕円率の楕円偏光となる。

【0135】ここで、例えば検光子5の偏光方向を、上記のX'(out)軸方向又はY'(out)軸方向と一致させた場合は、センサの感度は最小となる。なぜならば、ポッケルス素子4の出力光は、X'(out)軸方向及びY'(out)軸方向に振動する光のベクトル和であるから、検光子5をX'(out)軸又はY'(out)軸と平行に配置した場合には光量変化が生じないためである。一方、検光子5の偏光方向を、X'(out)軸又はY'(out)軸に対して45°だけ傾けた場合に、センサの感度は最大となる。

【0136】図19に示すように、X'(out)軸は、x軸に対して- {45° - (φ/2)} の角度だけ傾いている。最大感度が得られる検光子5の位置は、X'(out)軸より±45° ± 90° × n だけずれた位置なので、これはx軸に対してφ/2 ± 90° × n だけずれた位置である。

【0137】尚、旋光性を有するBi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶の場合、屈折率楕円体の2本の主軸(X'軸、Y'軸)が光の進行方向の位置によって図17に示すように変化していることを、以下の実験によって確かめた。

【0138】(i) λ/4板3を使用せず、偏光子2と検光子5との間に旋光性を有するポッケルス素子4のみを配置する。ポッケルス素子4の電気光学結晶としては、旋光角φ ≒ +30° のBi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶(厚さb ≒ 3mm)と、旋光角φ ≒ +60° のBi<sub>12</sub>GeO<sub>20</sub>結晶(厚さb ≒ 5.7mm)とをそれぞれ使用した。尚、図9に示すように、ポッケルス素子4の各結晶軸はx軸、y軸、z軸に一致している。

【0139】(ii) 次に、上記ポッケルス素子4に安定した約240V(出来るだけ高い値)の交流電圧を光の進行方向に印加する。

【0140】(iii) 偏光子2及び検光子5をz軸を中心として回転させながら、センサ出力のAC値が最大となる位置を捜す(オシロスコープの波形で確認する)。

【0141】(iv) 検光子5を上記(iii)の操作で捜したAC値最大の位置に固定した上で、偏光子2のみをz軸を中心として回転させながら、センサ出力のAC値が

最小（殆ど0）になる偏光子2の位置（偏光子2の偏光方向とx軸とのなす角度）を調べる。

【0142】上記の操作の結果、旋光角 $\phi$ が約 $30^\circ$ 、約 $60^\circ$ の何れの場合でも、偏光子2をx軸に対して約 $(-\phi/2) \pm 90^\circ \times n$ の角度だけ傾けたときに、センサ出力のAC値が殆ど0となった。また、偏光子2を上記の位置に配置した場合は、検光子5がどの位置に来ようとも、センサ出力のAC値は殆ど0のままであった。

【0143】これは、ポッケルス素子4の光の入射面に、x軸に対して約 $(-\phi/2) \pm 90^\circ \times n$ の角度だけ傾いた直線偏光を入射しても、その直線偏光はポッケルス素子4を通過する際に互いに直交する方向に振動する2つの光に分解されず（したがって位相差も生じず）にポッケルス素子4から直線偏光のまま出力されたためと考えられる。このことから、ポッケルス素子4の入射面の位置においては、図17に示すように、x軸に対して約 $(-\phi/2) \pm 90^\circ \times n$ の角度だけ傾いたところに、位相差を生じさせない偏光の固有軸である屈折率楕円体の主軸（X' (in) 軸、Y' (in) 軸）があることがわかる。

【0144】(v) 次に、偏光子2を上記 (iii) の操作で捜したAC値最大の位置に固定した上で、検光子5のみをz軸を中心として回転させながら、センサ出力のAC値が最小（殆ど0）になる検光子5の位置（検光子5の偏光方向とx軸とのなす角度）を調べる。

【0145】上記の操作の結果、旋光角 $\phi$ が約 $30^\circ$ 、約 $60^\circ$ の何れの場合でも、検光子5をx軸に対して約 $(+\phi/2) \pm 90^\circ \times n$ の角度だけ傾けたときに、センサ出力のAC値が殆ど0となった。また、検光子5を上記の位置に配置した場合は、偏光子2がどの位置に来ようとも、センサ出力のAC値は殆ど0のままであった。

【0146】これは、ポッケルス素子4内で分解された互いに直交する方向に振動する2つの直線偏光が、ポッケルス素子4の出射面から出射するときにx軸に対して約 $(+\phi/2) \pm 90^\circ \times n$ の角度だけ傾いた方向に振動しているためと考えられる。このことから、ポッケルス素子4の出射面の位置においては、図17に示すように、x軸に対して約 $(+\phi/2) \pm 90^\circ \times n$ の角度だけ傾いたところに、偏光の固有軸である屈折率楕円体の主軸（X' (out) 軸、Y' (out) 軸）があることがわかる。

【0147】以上の説明の通り、旋光性を有するポッケルス素子4を使用した場合、旋光性のない場合に比べて、結晶の旋光性によって偏光面が回転する方向と同一方向に旋光角 $\phi$ の約半分の角度（ $\approx \phi/2$ ）だけ傾いた位置を変調感度が最大となる基準位置とし、そこから検光子5を $\lambda/4$ 板3の特性（位相差の変化する方向）に応じた方向に角度 $\alpha$ だけ回転させれば、温度特性を改善することが出来るのである。

【0148】このことを検証するために、ポッケルス素子4として厚さ $b \approx 3\text{mm}$ の $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 結晶を使用し、約 $50^\circ$ （基準温度）から約 $30^\circ$ へ温度を変化させた場合の温度特性試験を行った。検光子5を感度最大の位置（x軸に対して $+15^\circ$ ）に置いた場合と、上述の温度特性を改善することができる方向に $22.5^\circ$ 回転させた場合とで、AC/DCの比誤差を実測したが、上記感度最大の位置では比誤差が $+0.17$ であったのに対し、そこから $22.5^\circ$ 回転させた位置では比誤差が $+0.05$ と十分に小さくなった。

【0149】尚、本実施の形態では、旋光性を有する電気光学結晶として、等方性の点群T（国際記号23）に属する $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ 結晶や $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ 結晶を例示したがこれに限定されるものではない。例えば、1軸性結晶である点群C<sub>3</sub>（国際記号3）や点群D<sub>3</sub>（国際記号32）に属する三方晶系の結晶等、旋光性を有する他の電気光学結晶を使用することもできる。

【0150】ポッケルス素子4として1軸性結晶を使用する場合は、その光学軸を光の進行方向と平行に配置すればよい。詳しくは、1軸性の電気光学結晶の光の進行方向の中間点における電圧未印加時の屈折率楕円体の3つの主軸、X軸、Y軸、Z軸（Z軸は光学軸）を、図9の直交座標軸x、y、zと一致させればよい。

【0151】また、上記の実施の形態1及び2では、光電圧センサについて説明したが、ポッケルス素子4の表面部に電極を設けることなく当該素子を電界中に配置すれば、光の進行方向の電界を測定することが可能であり、上記と同様の構成で高感度の光電界センサを構成することもできる。

【0152】

【発明の効果】請求項1の発明に係る光電圧・電界センサは、以上のように、波長板の基準温度における基準位相差からの偏移の方向が、使用温度範囲内で常に一定になるように設定されており、検光子については、電気光学結晶との間の位置関係によって定まる変調感度が最大となる基準位置に配された場合であって、波長板の位相差の上記設定方向への偏移により検光子出力の直流成分が基準位相差のときに比べて減少する場合には、当該基準位置より、光の進行方向の上流から下流に向かって左まわりに約 $30^\circ$ 以内の角度範囲内に配置される一方、波長板の位相差の上記設定方向への偏移により検光子出力の直流成分が基準位相差のときに比べて増加する場合には、当該基準位置より、光の進行方向の上流から下流に向かって右まわりに約 $30^\circ$ 以内の角度範囲内に配置されている構成である。

【0153】それゆえ、光学部品の位置関係を適正化することによって、新たな部品を増やすことなく、センサの温度特性を改善することができ、使用温度範囲に亘って高精度な測定を行うことができるという効果を奏する。



【0154】請求項2の発明に係る光電圧・電界センサは、以上のように、請求項1の発明の構成において、上記電気光学結晶が旋光性を有し、上記検光子の基準位置は、当該検光子の偏光方向が、上記電気光学結晶における光の進行方向と直交する結晶軸に対して、当該結晶の旋光性によって偏光面が回転する方向と同一方向に旋光角の略半分の角度だけ傾けられた位置となっている構成である。

【0155】それゆえ、このように検光子の基準位置を決めて検光子の位置を適正化すれば、電気光学結晶を使用する場合にもセンサの温度特性を改善することができるという効果を奏する。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の一形態を示すものであり、光電圧センサのセンサ部の要部構成を示す斜視図である。

【図2】上記光電圧センサの概略のブロック図である。

【図3】光電圧センサのセンサ部の平行偏光子の構成を示す斜視図である。

【図4】 $\lambda/4$ 板で生じる位相差の偏移による偏光形状の変化を説明するための図である。

【図5】温度変化によって $\lambda/4$ 板の位相差が $90^\circ$ から $89^\circ$ に変化したときの、検光子の角度（x軸とのなす角度）と比誤差との関係を示すグラフである。

【図6】温度変化によって $\lambda/4$ 板の位相差が $90^\circ$ から $91^\circ$ に変化したときの、検光子の角度（x軸とのなす角度）と比誤差との関係を示すグラフである。

【図7】温度変化によって $\lambda/4$ 板の位相差が $90^\circ$ から $89^\circ$ に変化したときの、検光子の角度（y軸とのなす角度）と比誤差との関係を示すグラフである。

【図8】温度変化によって $\lambda/4$ 板の位相差が $90^\circ$ から $91^\circ$ に変化したときの、検光子の角度（y軸とのなす角度）と比誤差との関係を示すグラフである。

【図9】本発明のその他の実施の一形態を示すものであり、光電圧センサのセンサ部の要部構成を示す斜視図である。

【図10】直交座標系において、偏光子の偏光方向、及び $\lambda/4$ 板のa、c軸の方向を示す説明図である。

【図11】図10の光学部材の配置において、 $\lambda/4$ 板の出射光の状態、ポッケルス素子の出射光の状態、及び変調感度が最大となる検光子の偏光方向をそれぞれ示す説明図である。

【図12】直交座標系において、偏光子の偏光方向、及

び $\lambda/4$ 板のa、c軸の方向を示す説明図である。

【図13】図12の光学部材の配置において、 $\lambda/4$ 板の出射光の状態、ポッケルス素子の出射光の状態、及び変調感度が最大となる検光子の偏光方向をそれぞれ示す説明図である。

【図14】直交座標系において、偏光子の偏光方向、及び $\lambda/4$ 板のa、c軸の方向を示す説明図である。

【図15】図14の光学部材の配置において、 $\lambda/4$ 板の出射光の状態、ポッケルス素子の出射光の状態、及び変調感度が最大となる検光子の偏光方向をそれぞれ示す説明図である。

【図16】旋光性を持たないポッケルス素子の屈折率楕円体の切断面を示す説明図であり、図16中の（a）は電圧未印加時、同図中の（b）は電圧印加時の屈折率楕円体の切断面を示す。

【図17】旋光性を有するポッケルス素子において、光の進行方向の位置によって屈折率楕円体の主軸が変化する状態を示す説明図である。

【図18】図17のポッケルス素子の屈折率楕円体の切断面を示す説明図であり、図18中の（a）は光の入射面、同図中の（b）は光の進行方向の中間点、同図中の（c）は光の出射面における電圧印加時の屈折率楕円体の切断面を示す。

【図19】図9の光電圧センサのセンサ部において、最大感度が得られる検光子の偏光方向を示す説明図である。

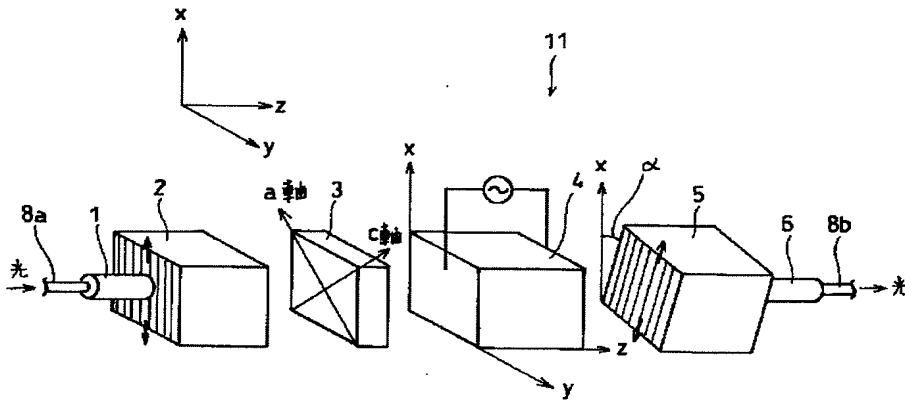
【図20】従来の光電圧センサの概略のブロック図である。

【図21】従来の光電圧センサのセンサ部の要部構成を示す斜視図である。

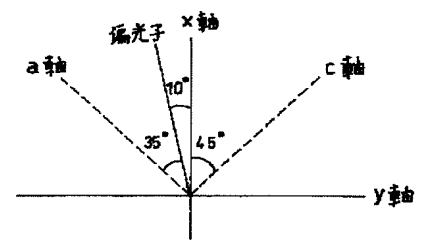
#### 【符号の説明】

- |    |                    |
|----|--------------------|
| 1  | コリメータ              |
| 2  | 偏光子                |
| 3  | $\lambda/4$ 板（波長板） |
| 4  | ポッケルス素子（電気光学結晶）    |
| 5  | 検光子                |
| 6  | コリメータ              |
| 10 | 光電圧センサ             |
| 11 | センサ部               |
| 12 | 発光回路               |
| 13 | 受光回路               |

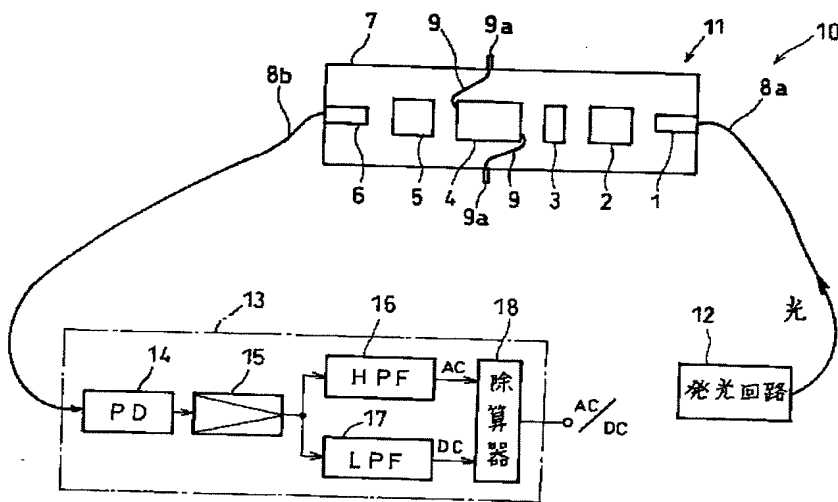
【図1】



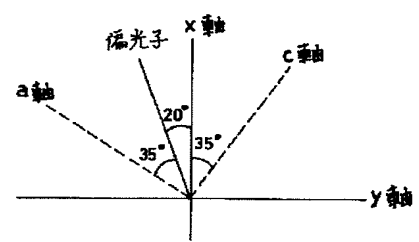
【図10】



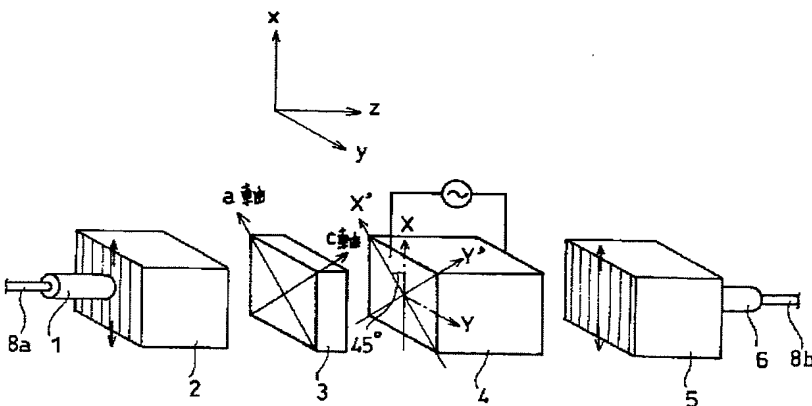
【図2】



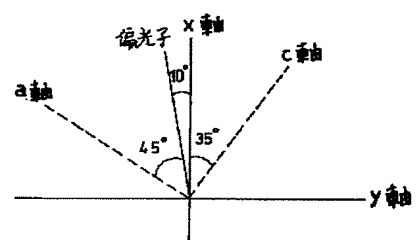
【図12】



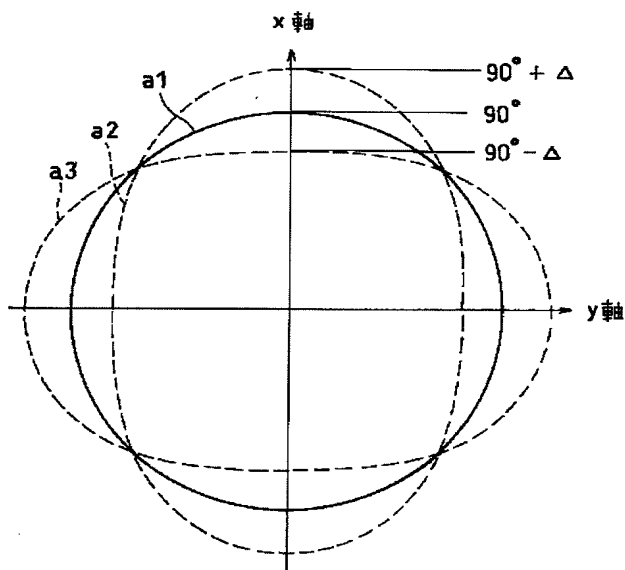
【図3】



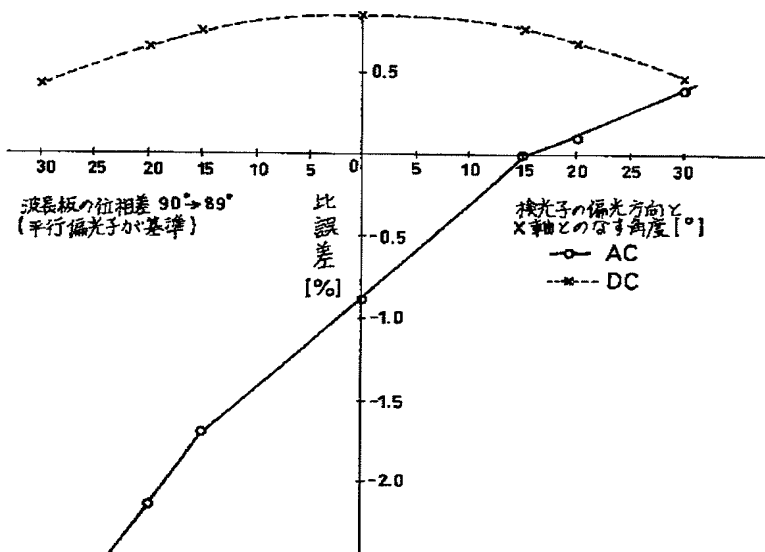
【図14】



【図 4】

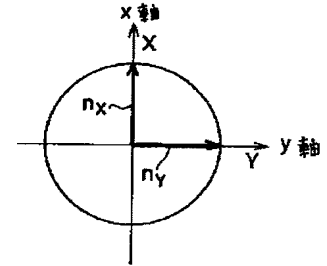


【図 5】

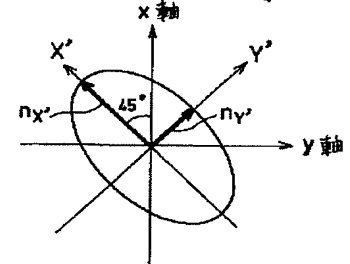


【図 16】

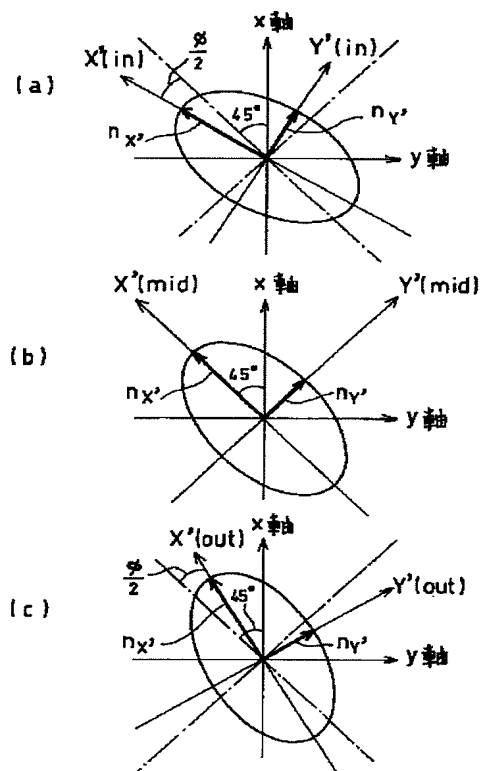
(a) Z 軸方向の電界が 0 の場合



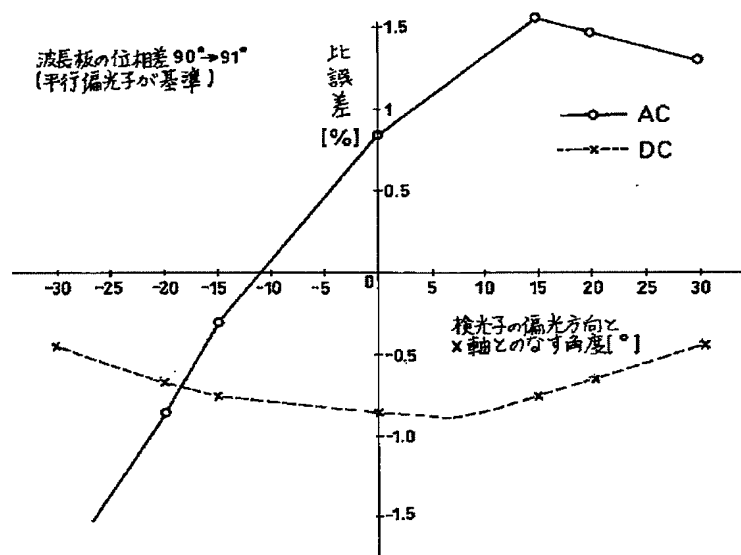
(b) Z 軸方向に電界を印加した場合



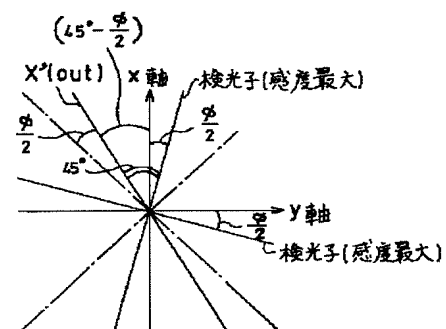
【図 18】



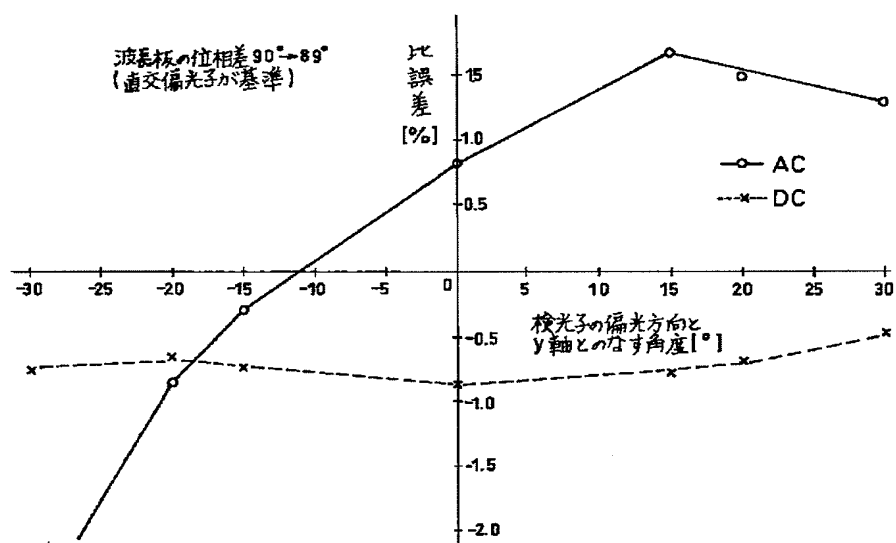
【図6】



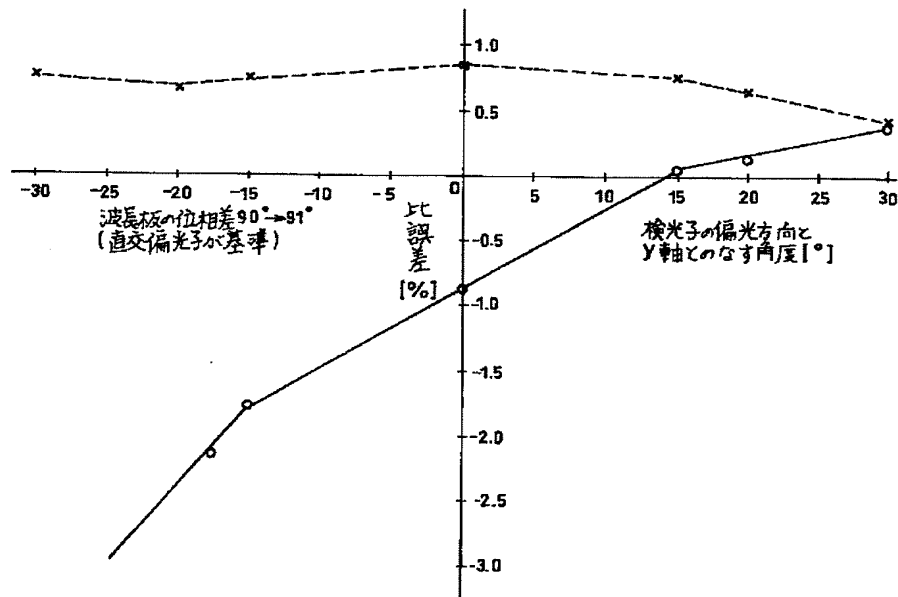
【図19】



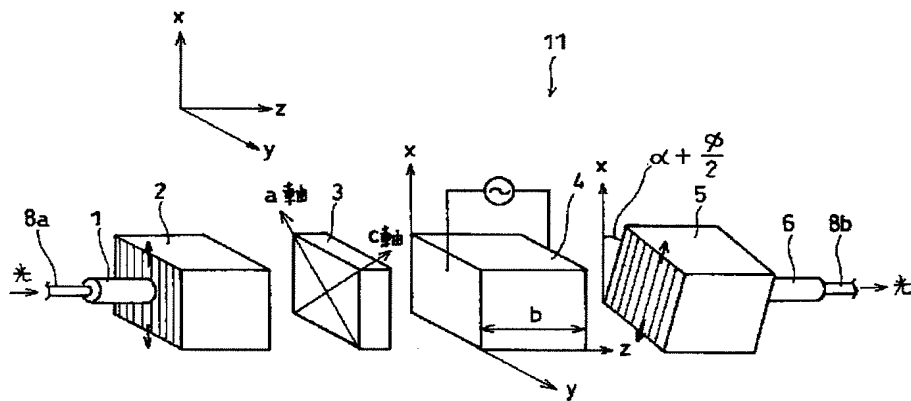
【図7】



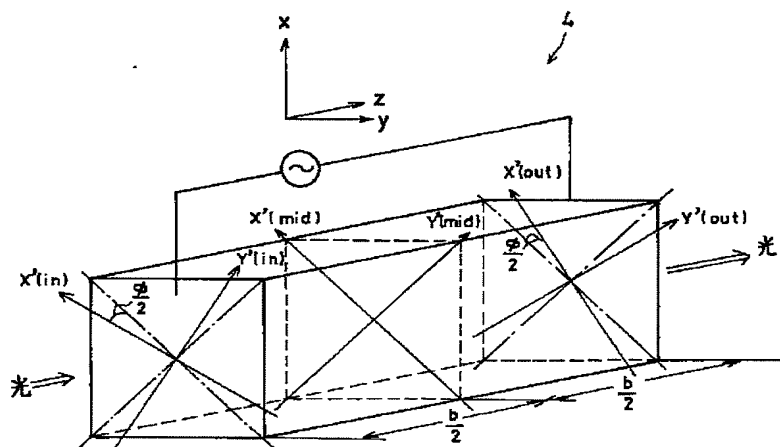
【図8】



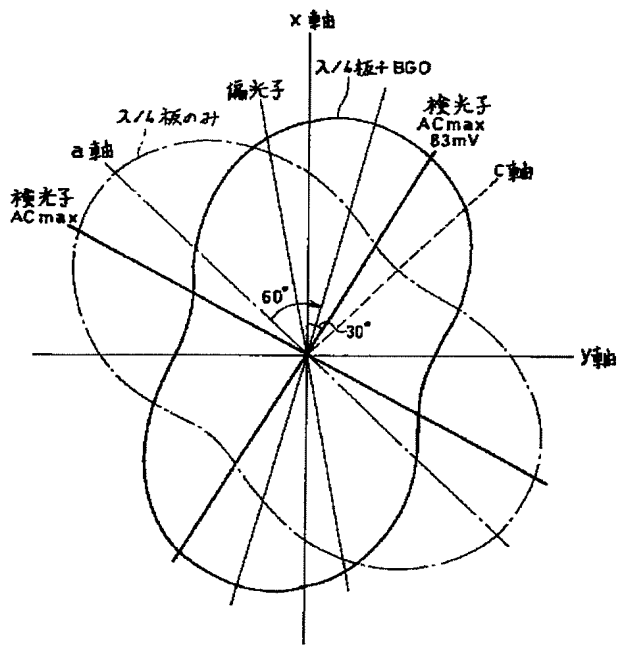
【図9】



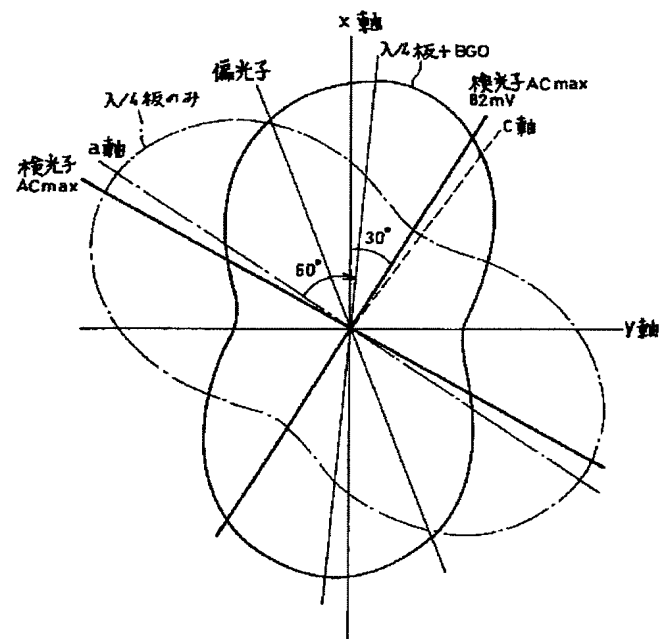
【図17】



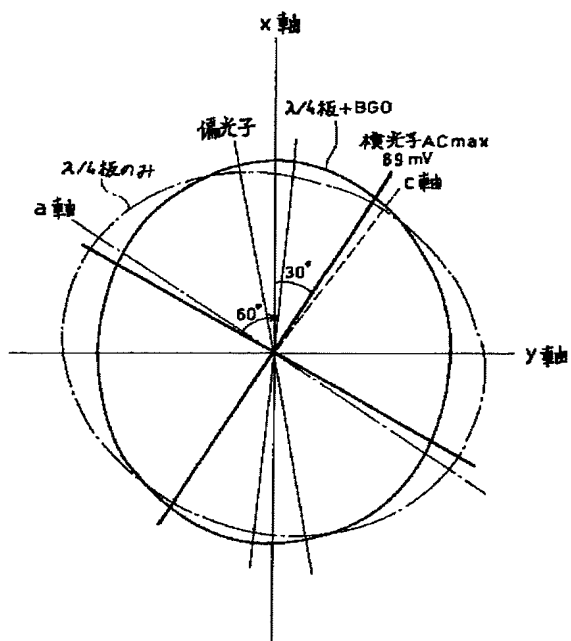
【図11】



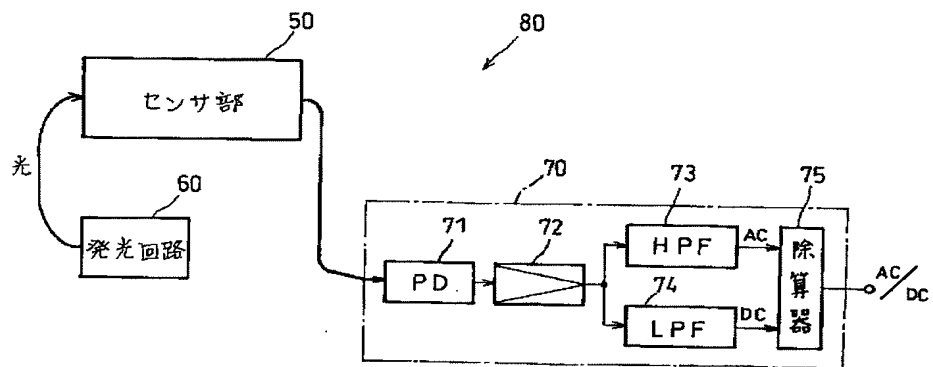
【図13】



【図15】



【図20】



【図21】

